Digestion microbienne chez les ruminants

Aude FERRAN

Plan

- Introduction

- Milieu ruminal
- Ecosystème microbien du rumen

- La digestion microbienne
- Le devenir des produits de la digestion

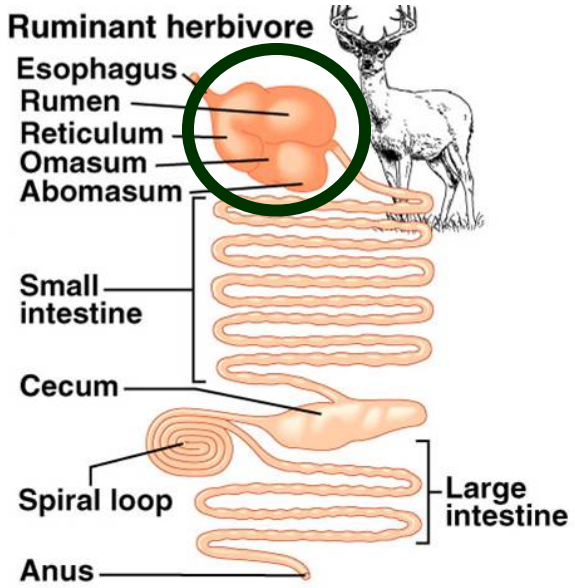
Historique

- Zuntz 1879 : élève de Pasteur
  - les micro-organismes du rumen sont responsables **des fermentations** et assurent la production des acides gras volatils **(AGV)** et des gaz (CO_2 et CH_4)
  - les ruminants **absorbent et utilisent ces AGV.**

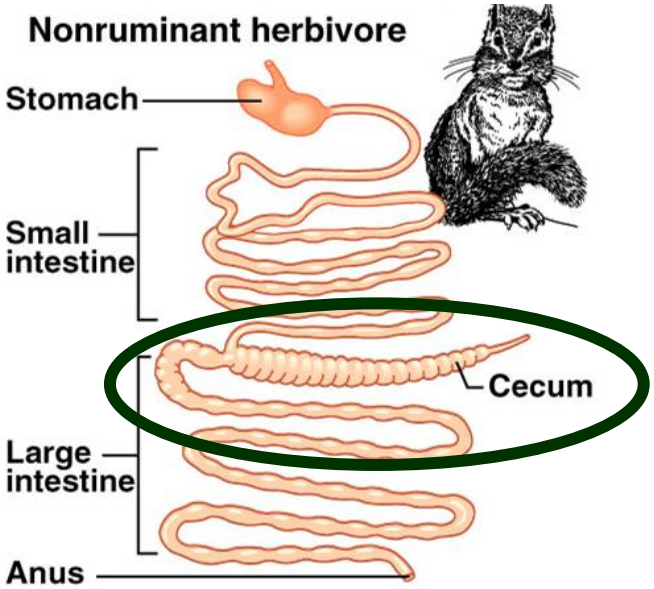
Cette dernière idée est contestée à une époque où la fermentation évoquait la putréfaction et le CH_4 se nommait le gaz des marais

Introduction

- Herbivores
  - Fermenteurs pré-gastriques



  - Fermenteurs post-gastriques



Introduction

Fermenteurs pré-gastriques

Types	espèces
Ruminants	**Bovins,** **Ovins,** **Caprins**
Non ruminants	Hamster, campagnol kangourou hippopotame

Fermenteurs post-gastriques

Types	espèces
Digestion caecale associée à la ceacotrophie	Lapin
Digestion colonique	Éléphant, cheval

Introduction

- **Avantages** d'une fermentation prégastrique
  - Meilleure utilisation d'aliments de faible qualité nutritionnelle
    - Cellulose
    - Azote non protéique
  - Destruction présystémique de substances toxiques
    - Oxalates, cyanure, alcaloïdes
  - Synthèses
    - Acides aminés essentiels
    - vitamine B

Introduction

- **Désavantages** d'une fermentation prégastrique
  - Perte d'énergie

Pertes	% du total des calories
Méthane	5-8
Chaleur de fermentation	5-6

Le rendement dépend du pourcentage des glucides non cellulosiques.

  - Pertes protéiques
    - De l'ammoniaque résultant de l'activité microbienne sera absorbé et excrété
    - 20% de l'azote des bactéries est sous la forme d'acides nucléiques

Introduction

- **Désavantages** d'une fermentation prégastrique
  - Les ruminants sont susceptibles aux **toxines produites** par les bactéries du rumen avec conversion de:
    - nitrates en nitrites
    - urée en ammoniaque
    - glucides en acide lactique
    - tryptophane en 3-methyl-indole

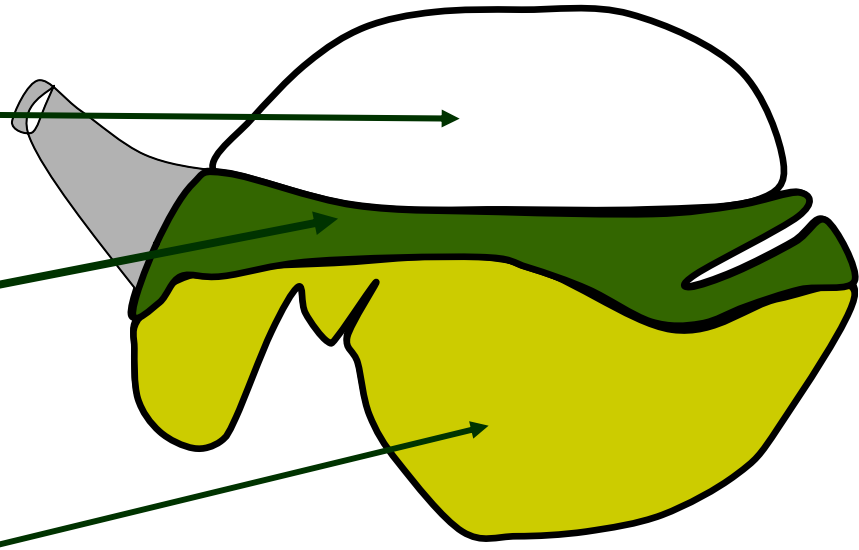
Introduction

- Adaptations physiologiques aux relations symbiotiques
  - Apport régulier d'aliments
  - Aliments soigneusement **mastiqués et insalivés**
  - **Brassage** régulier du contenu ruminal
  - **Conditions ruminales** particulières
  - Absorption des AGV
  - Evacuation des gaz

Milieu ruminal

- Stratification du contenu
  - Partie dorsale : **gaz**
  - Partie centrale **: langue de fourrage (14-18% MS)**
  - Partie ventrale : **fluides (6-9%MS)**, fourrages saturés en fluide, petites particules

    La portion liquidienne a la même composition entre le réseau et le rumen



Représentation schématique du contenu du réticulo-rumen

Milieu ruminal

- Contenu en matière sèche
  - Le **sac ventral est très liquide**
  - Le partie centrale du rumen a un contenu supérieur en MS car formé des plus grosses particules
- Température : **plus élevée** que la température rectale (40°C vs. 38°C)
- Pression osmotique
  - Voisine de celle du sang (augmente après un repas)
  - Si hyperosmotique : passage d'eau du secteur vasculaire au rumen
  - Si hypo-osmotique : passage d'eau du rumen au secteur vasculaire

Milieu ruminal

- **pH compris entre 5.5 et 7.3**
  - Valeur optimale **autour de 6**
  - Significativement plus bas
    - 2 à 6 h après la prise de nourriture (production des AGV)
    - **avec une ration riche en concentrés (grains, aliments granulés, …)**
  - Existence de systèmes tampons (salive) :
    - entre pH 6-8 : surtout phosphates
    - entre pH 5-6: bicarbonates
    - pH<5 : AGV

Milieu ruminal

- Importance de la **salive**
  - Production de :
    - **100 à 200 L par jour chez les bovins**
    - **3 à 16 L par jour chez un mouton**

    = soit 4-5 fois l'ingestion quotidienne d'eau.
    - Production maximale avec de la nourriture à base d'herbe et moindre avec une alimentation à base de granulés
  - La moitié de la salive est issue des **parotides** (sécrétion continue, isotonique au plasma)
  - **Contrôle de la sécrétion** lié à la prise de nourriture, la rumination et par des récepteurs localisés dans le RR

Milieu ruminal

- Importance de la **salive**
  - Contrôle du **pH** du RR
    - La salive est alcaline (pH=8) et apporte des **bicarbonates et des phosphates**
  - **Pas de rôle digestif propre** (pas d'amylase ni de lipase salivaire)
  - Contrôle la **teneur hydrique** du RR
  - Rôle **tensioactif** : évite la formation de mousse stable
  - **Apport d'azote** dont 80% sous forme d'urée
    (Apport azoté de 40 g/j chez un bovin)

Milieu ruminal

- **Anaérobiose**
  - Fondamentale : **sans O_2, les dégradations s'arrêteront au stade d'acides organiques; en présence de O_2, elles iraient jusqu'au CO_2**
  - **Maintenue** par l'absorption immédiate de l'O_2 consommé par les bactéries anaérobies facultatives

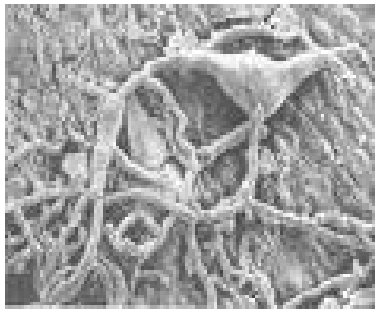
→ Milieu favorable au développement et au maintien de populations microbiennes

Population microbienne du RR

- **Bactéries** < 5 µm
  - 10^9-10^{10} bactéries/mL de jus de rumen
  - environ 1 kg de bactéries chez une vache (10% de la MS du RR)

- **Protozoaires (ciliés)** 20-200 µm
  - 10^4 à 10^6 /mL de jus de rumen
  - environ 2 kg de protozoaires chez un bovin

- **Champignons (moisissures)** 20-200 µm
  - 10^4/mL



- **Archaea** (ex archéobactéries)
  - 10^8/mL

Population microbienne du RR

- Variation de la population microbienne avec de nombreux facteurs
  - Régime alimentaire, saison, …

- Régime alimentaire
  - La taille de la population augmente au pâturage
  - **Un régime riche en amidon**
    - **diminue le pH du RR**
    - **augmente le nombre total de bactéries**
    - **augmente la taille de la population de *Streptococcus bovis***
    - **diminue le nombre de protozoaires**

ATTENTION, les modifications de flore se produisent sur 2 semaines et il faut être prudent lors de transition alimentaire

Population microbienne du RR

- Développement de la flore microbienne
  - Le rumen contient des microorganismes dès les premiers jours de la vie
  - A une semaine, les lactobacilles sont nombreux car le pH du RR est bas (régime lacté)
  - Chez le veau, à l'âge de **15 jours**, le faciès bactérien est similaire à celui de l'adulte
  - Modalités de transmission
    - D'un animal à l'autre (léchage)

Population microbienne du RR

- **Espèces bactériennes**
  - **Anaérobies: 98%**
  - **Cellulolytiques: 14%**
  - **Amylolytiques: 39%**
  - Capables d'utiliser le glucose: 72%
  - Capables d'utiliser le xylose: 54%
  - Capables d'utiliser la cellobiose: 71%

Population microbienne du RR

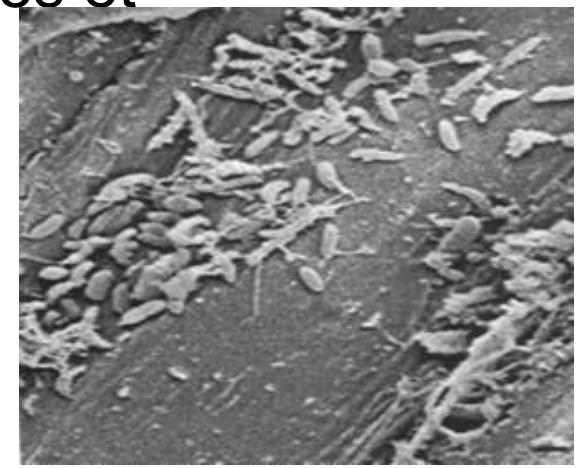
- **Principales espèces bactériennes**
  - Cellulolytiques
    - *Bacteroides succinogenes*
    - *Ruminococcus albus*
    - *Ruminococcus flavefaciens*
    - *Butyrivibrio fibrisolvens*
  - Hémicellulolytiques
    - *Bacteroides ruminicola*
    - *Butyrivibrio fibrisolvens*
  - Amylolytiques
    - *Bacteroides amylophilus*
    - ***Streptococcus bovis*** **(aérobie facultatif)**
    - *Bacteroides ruminicola*

Population microbienne du RR

- **Principales espèces bactériennes**
  - **Cellulolytiques et Hémicellulolytiques**
    - Hydrolysent la cellulose et l'hémicellulose
    - Développement lent et métabolisme lent
    - Bien **développées avec les régimes riches en fourrage**
    - Très sensibles au pH acide (**nécessité d'un pH>6**)
    - Produisent de l'**acétate**, du propionate, un peu de butyrate et du CO_2
    - Ne représentent jamais plus de 25% de la population bactérienne

Population microbienne du RR

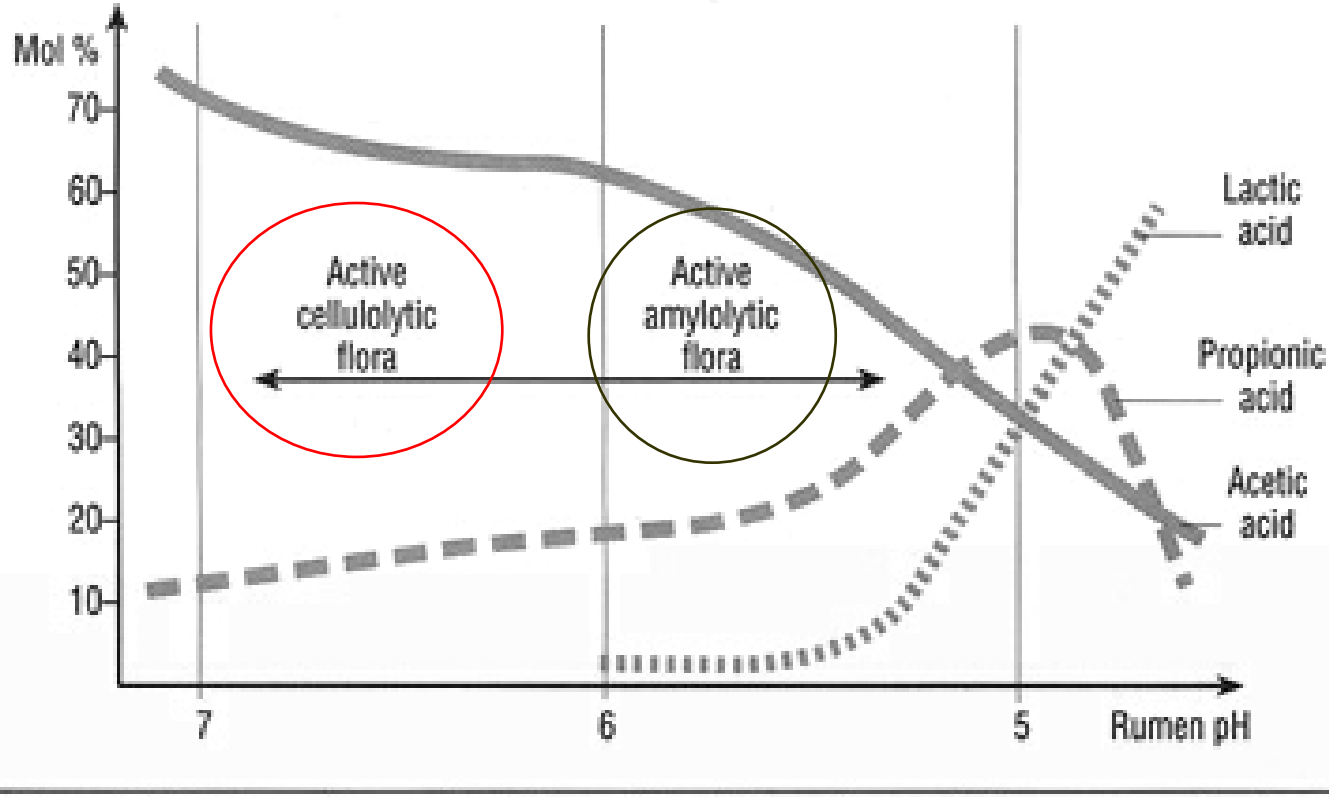
- **Principales espèces bactériennes**
  - **Cellulolytiques**
    - Les bactéries s'attachent sur les fibres et **sécrètent des enzymes (**complexe enzymatique : **cellulase)**



    - Clivage des liaisons β1→4
    - La cellobiose (2 glucoses) produite entre ensuite dans la cellule et est hydrolysée en glucose dans la bactérie

Population microbienne du RR

Figure 2. Ruminal fermentation as a consequence of adaptation due to pH regulation.



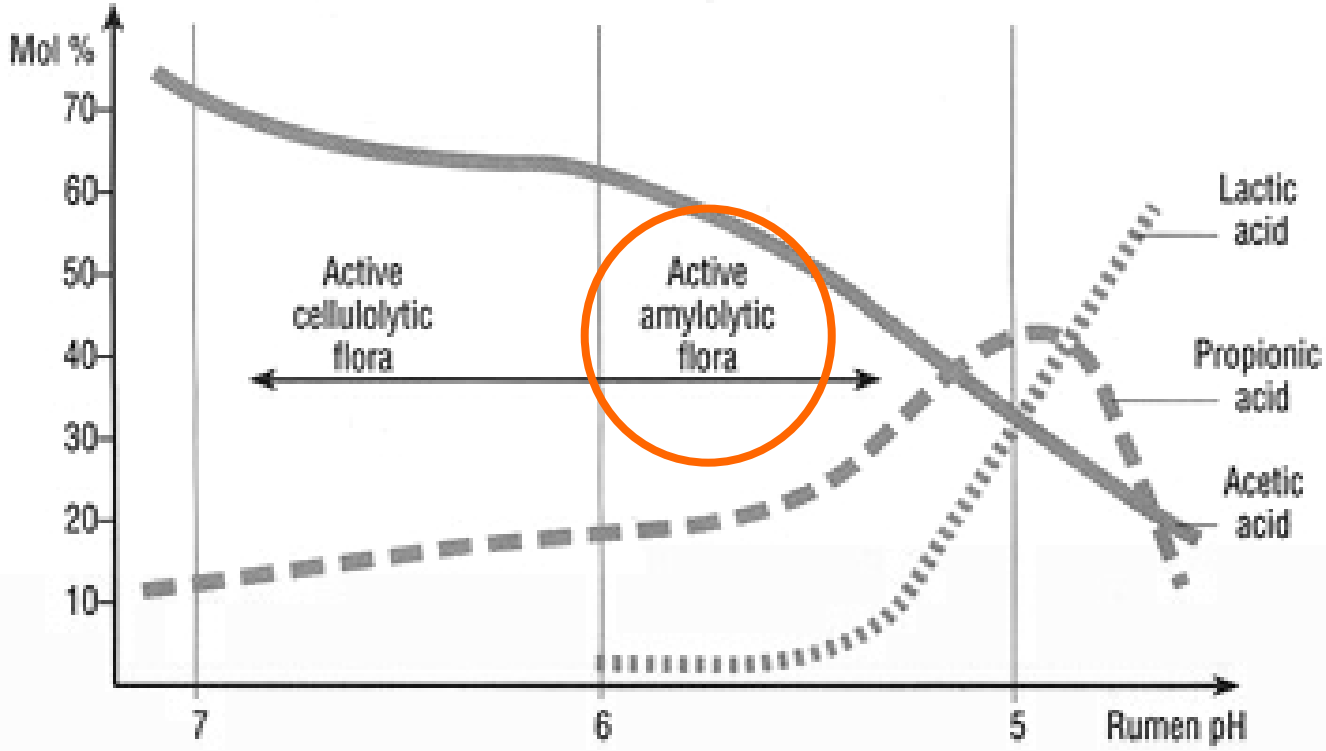
Kaufman, W., H. Hagemeister, and G. Durksen. Adaptation to changes in dietary composition level and frequency of feeding. In: Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants, ed. Y. Ruckebusch and P. Thivend. Westport, Ct.: AVI Publishing, 1980, p. 587.

Population microbienne du RR

- **Principales espèces bactériennes**
  - **Amylolytiques**
    - Digèrent l'amidon
    - Bien **développées avec un régime riche en grain**
    - Tolèrent des **pH plus acides (pH=5-6)** que les cellulolytiques. Si le pH est trop bas, population de lactobacilles devient prédominante
    - Produisent plus de **propionate** que les cellulolytiques, du butyrate et des **lactates**

Population microbienne du RR

Figure 2. Ruminal fermentation as a consequence of adaptation due to pH regulation.



Kaufman, W., H. Hagemeister, and G. Durksen. Adaptation to changes in dietary composition level and frequency of feeding. In: Digestive Physiology and Metabolism in Ruminants, ed. Y. Ruckebusch and P. Thivend. Westport, Ct.: AVI Publishing, 1980, p. 587.

Population microbienne du RR

- **Principales espèces bactériennes**
  - **Amylolytiques**
    - ***Streptococcus bovis*** est considéré comme « la mauvaise herbe » du rumen
      - **Développement extrêmement rapide** (doublement en 13 min) lorsque les conditions sont favorables (beaucoup d'**amidon/sucres** et un **pH bas**)
      - Production d'acide lactique : **risque de syndrome d'acidose**
    - Ce type de croissance exubérante est contrôlé par les antibiotiques dits « **ionophores** » (monensin)

Population microbienne du RR

- **Autres espèces bactériennes**
  - Souches utilisant des sucres simples
  - Souches utilisant préférentiellement des acides organiques
    - Substrat : acide lactique, succinique, formique …
    - **Propionobactéries**
  - Souches protéolytiques (12 à 38 % des bactéries)
    - Peuvent utiliser des acides aminés comme source énergétique
  - Souches lipolytiques
    - Capables d'utiliser le glycérol, les triglycérides (qui seront hydrogénés)

Population microbienne du RR

- **Autres espèces bactériennes**
  - Souches utilisant l'ammoniaque
  - Souches productrices de méthane

    Ex: *Methanobacterium formicicum, Methanobrevibacter ruminantium*

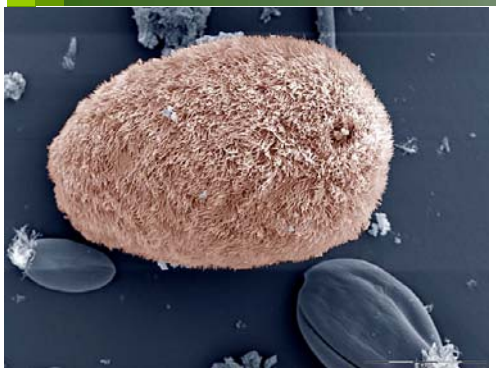
    - CH_4 est utilisé par les microbes comme énergie ou éliminé par éructation
    - La production de CH_4 représente une **perte d'énergie pour l'animal**
    - Gaz à effet de serre !!

Population microbienne du RR

- **Protozoaires =** organismes unicellulaires de grande taille (20-200 microns)
  - **Ecologie**
    - 10^4-10^6 cellules/mL de jus ruminal
    - Espèces **ciliées anaérobies** (présence de cils vibratiles)
      - **Holotriches (25%)** avec des cils sur toute la surface
      - **Oligotriches (75%)** avec des cils oraux
    - Genre Entodinium majoritaire
    - Principalement localisés sur la langue de fourrage

Un protozoaire du rumen (du genre Polyplastron) qui a ingéré 3 petits protozoaires (du genre Dasytricha) entouré par des bactéries et des champignons (x 400 fois).
Photo credit: Andrew Williams

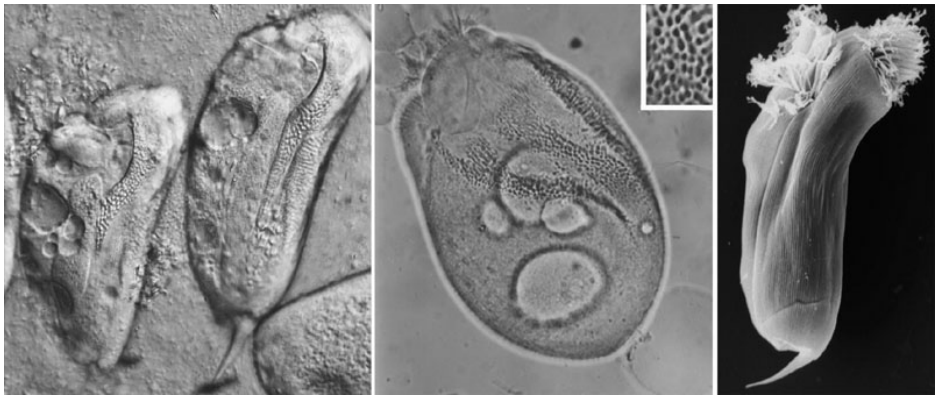
Protozoaires du RR



Isotrichia

Entodinium

- **Ciliophores** (Ciliés)
  - **Holotriches** — Cils ubiquitaires
    - <100 µm **Dasytricha**
    - >120 µm **Isotricha**
  - **Oligotriches** — Cils oraux & +/- parsemés
    - Cils oraux
      - **Entodinium**
    - Cils oraux & parsemés
      - **Epidinium**
      - **Diplodinium**
      - **Eudiplodinium**
      - **Polyplastron**



Epidinium

Population microbienne du RR

- **Protozoaires**
  - Conditions du RR
    - **Strictement anaérobies; pH de 5.5 à 7.6**
  - Variations en fonction de l'alimentation
    - Population plus importante avec les régimes **riches en énergie**
    - Les régimes **trop riches** en concentrés entraînent la **disparition des protozoaires par baisse** du pH

Population microbienne du RR

- **Protozoaires**
  - **Ingèrent** des particules alimentaires, des bactéries **(régulation des populations bactériennes)** ou d'autres protozoaires
  - **Digèrent dans des vacuoles digestives**
    - **des glucides** : certains sont cellulolytiques
    - **des protéines**
    - **des lipides** : importance dans la digestion des galactolipides
  - **Stockent** certains substrats (amidon, acides gras insaturés)
  - Digérés dans la caillettte ce qui permet au ruminant d'absorber ces composants
  - Incapables d'utiliser de l'azote non protéique et de synthétiser de la vitamine B **(nécessité de bactéries)**

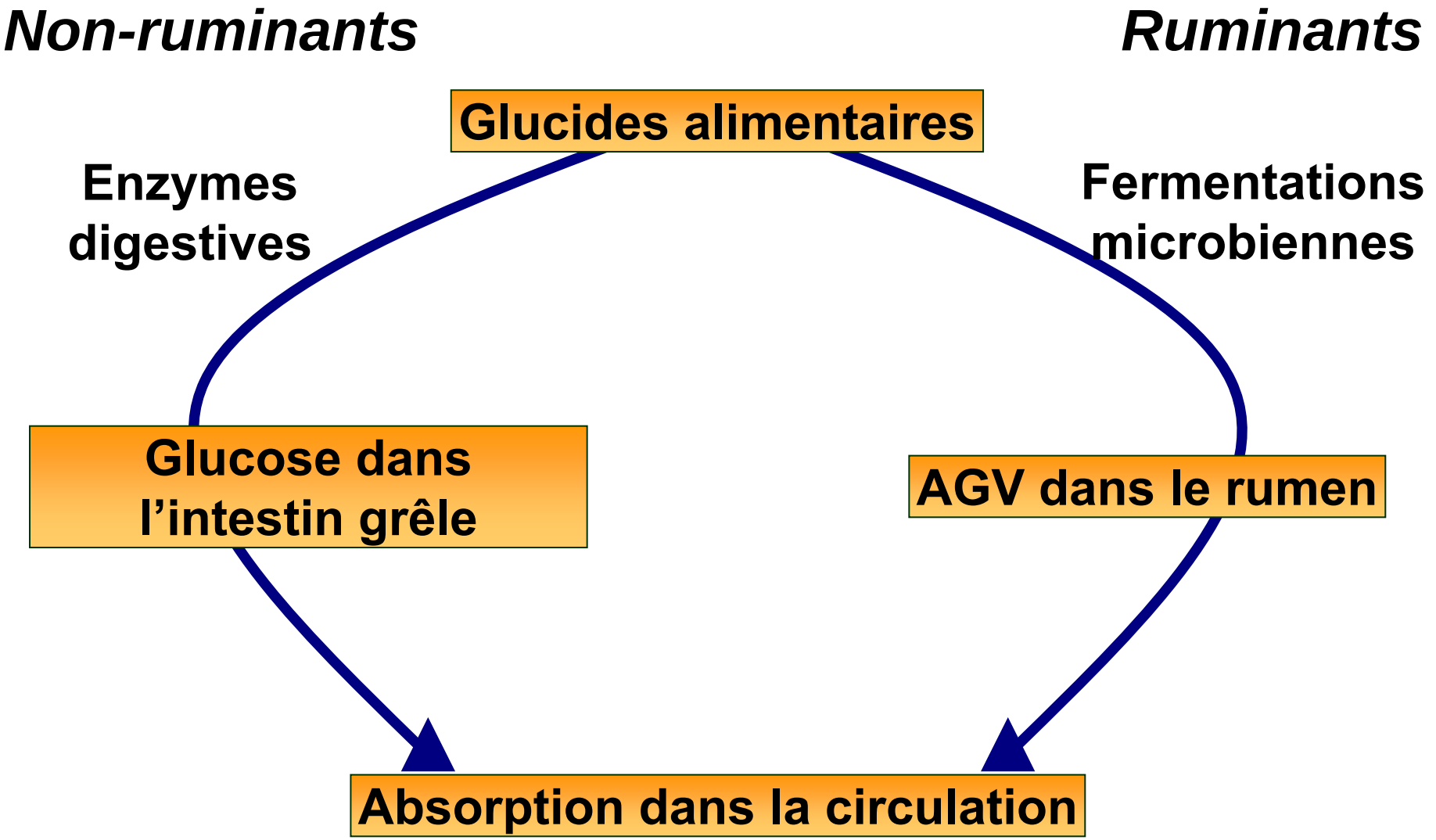
Population microbienne du RR

- **Protozoaires**
  - **Rôles**
    - Pas indispensables aux ruminants
    - Régulent les populations bactériennes
    - Métabolisent l'acide lactique et diminuent les risques d'acidose

Population microbienne du RR

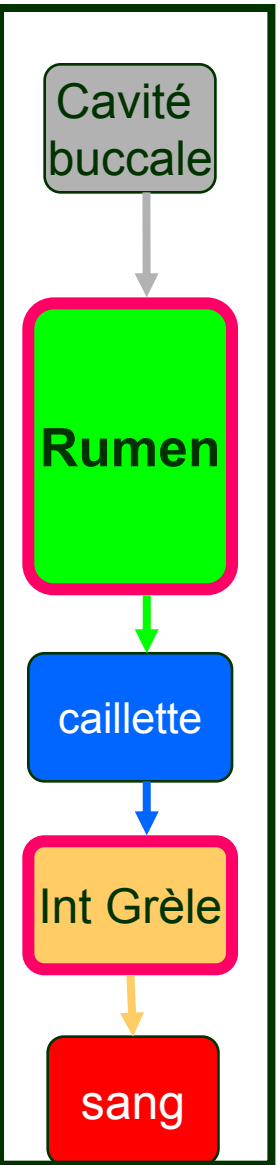
- **Localisation**
  - **sur les particules végétales**
    - Bactéries, champignons, protozoaires
  - **libre dans la phase liquide**
    - Bactéries, protozoaires (espèces à croissance rapide qui se nourrissent de substrat solide)
  - **épimurale sur la paroi du rumen**
    - Recyclages des protéines des cellules desquamées
    - Utilisation de l'oxygène
    - Hydrolyse de l'urée

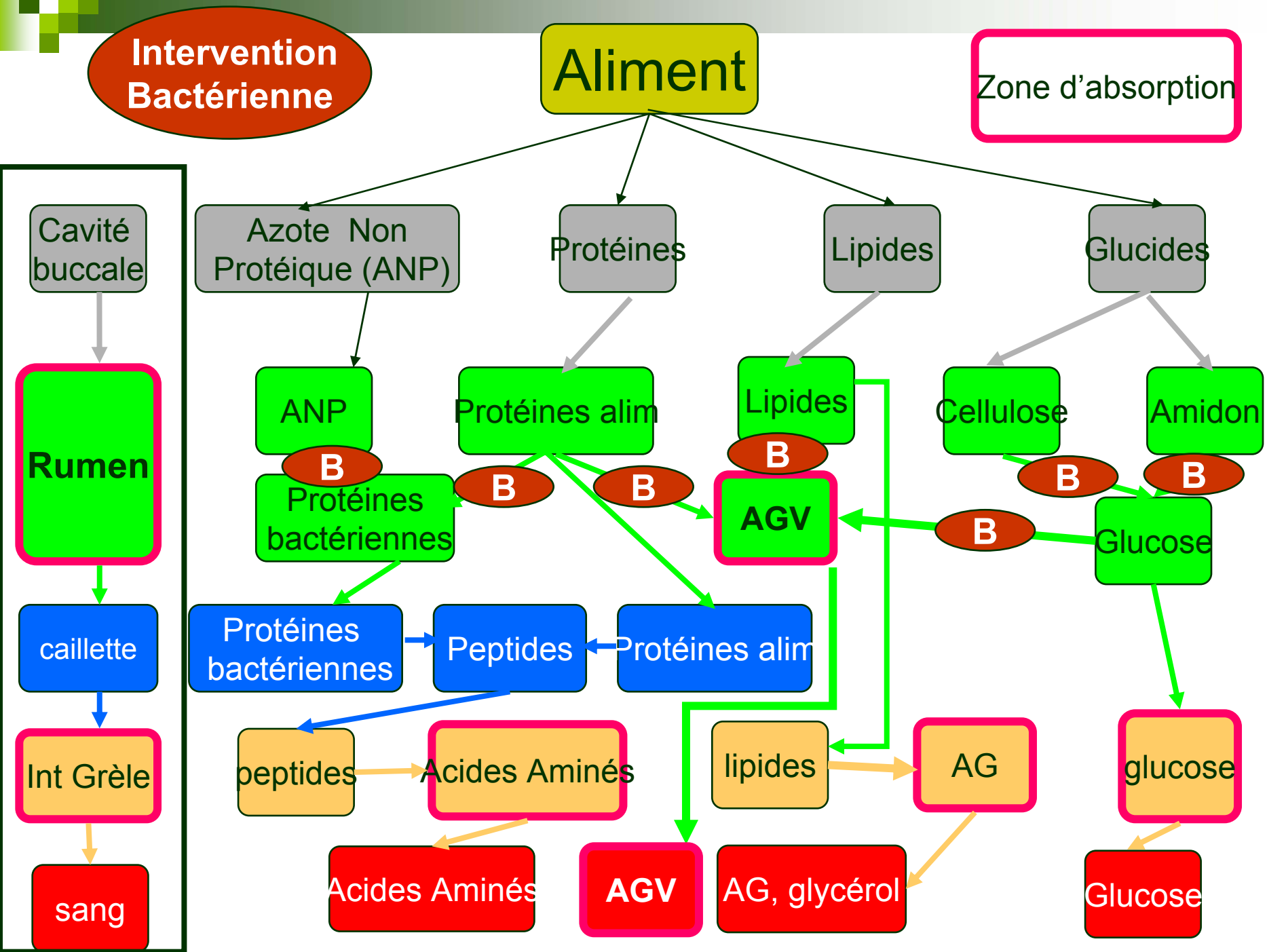
Digestion et absorption : ruminants vs. non ruminants



Intervention Bactérienne

Zone d'absorption




Intervention Bactérienne
Aliment
Zone d'absorption
Cavité buccale
Azote Non Protéique (ANP)
Protéines
Lipides
Glucides
Rumen
ANP
Protéines alim
Lipides
Cellulose
Amidon
B
B
B
B
B
B
B
Protéines bactériennes
AGV
Glucose
caillette
Protéines bactériennes
Peptides
Protéines alim
Int Grèle
peptides
Acides Aminés
lipides
AG
glucose
sang
Acides Aminés
AGV
AG, glycérol
Glucose

La digestion fermentaire

- **Les bactéries anaérobies, les protozoaires, et les champignons** produisent les enzymes capables de **digérer des glucides, des protéines et des lipides**

- Produits de la fermentation :
  - Acides gras volatils (acétate, propionate, butyrate)
  - Méthane
  - CO_2
  - Ammoniac (NH_3)

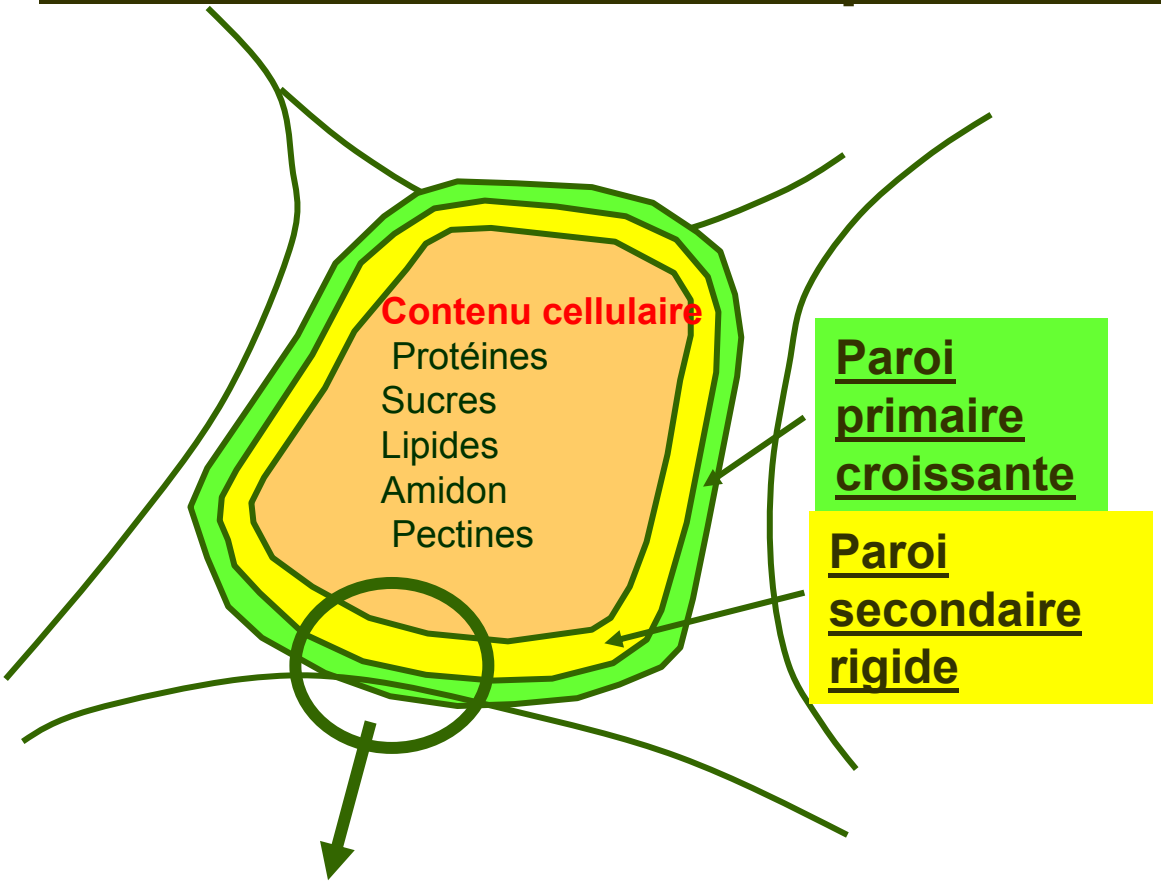
La digestion fermentaire

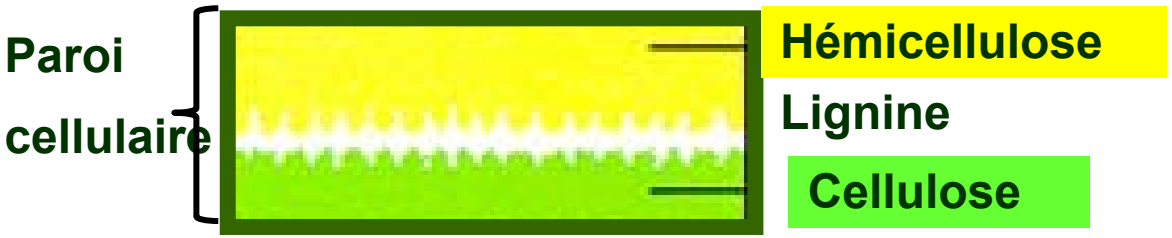
- **Digestion anaérobie**
  - Pas d'oxygène
  - Oxydation par perte d'hydrogène qui est récupéré par NAD^+ pour donner NADH + H^+

Composition en glucides d'aliments usuels des ruminants

Glucides %MS	Luzerne	Herbe	Maïs
Glucides solubles	5	4	2
Cellulose	**25**	**30**	0
Hémicellulose	**22**	**26**	6
Pectine	6	4	0
Amidon	2	1	**72**

Structure de la paroi végétale





Digestion des glucides

- Glucides = 75% de la masse du tissu végétal
  - Glucides structuraux
    - Cellulose
    - Hémicellulose
    - Pectine
  - Glucides de réserve
    - Amidon
  - Sucres simples

Digestion des glucides

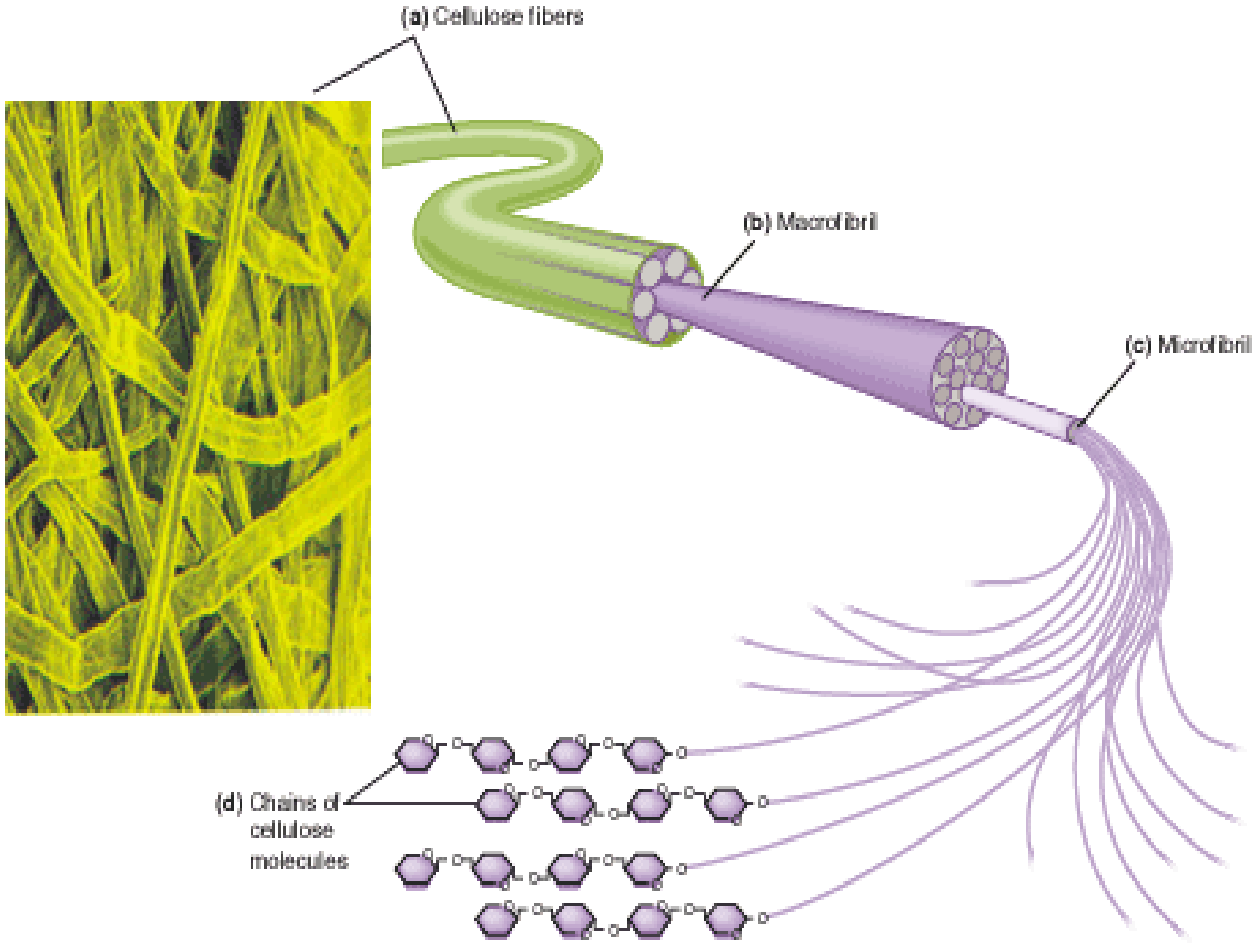
- Glucides structuraux ou de soutien ou parietaux =polysaccharides
  - composent les parois cellulaires =**30-80% de la MS végétale**
  - **Trame de cellulose** formant un réseau cristallin qui assure la rigidité des structures végétales
  - Trame remplie de **polyholosides amorphes** (hémicellulose, pectines) et de lignine (pas glucidique)

Digestion des glucides

- Glucides structuraux : **dégradation**
  - Cellulose: 70 à 80 %
  - Hémicellulose: 80 à 90%
  - Pectine : 100%

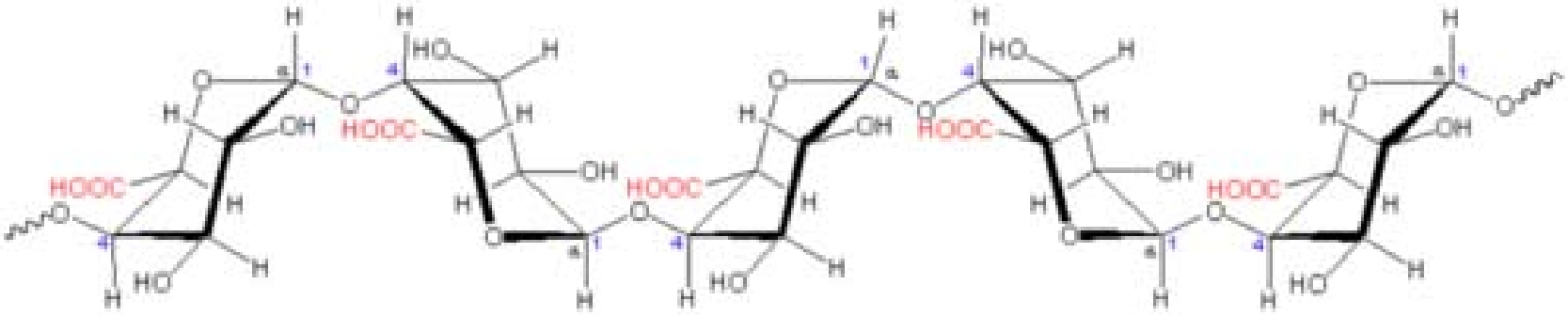
  - Facteurs de variation
    - Présence de lignine
    - Faciès microbien
      - Un profil amylolytique fait chuter de 80 à 15% la digestibilité de la cellulose
    - Temps de séjour
      - Si trop court (broyage trop fin des aliments), il y a réduction de la digestibilité

Digestion des glucides



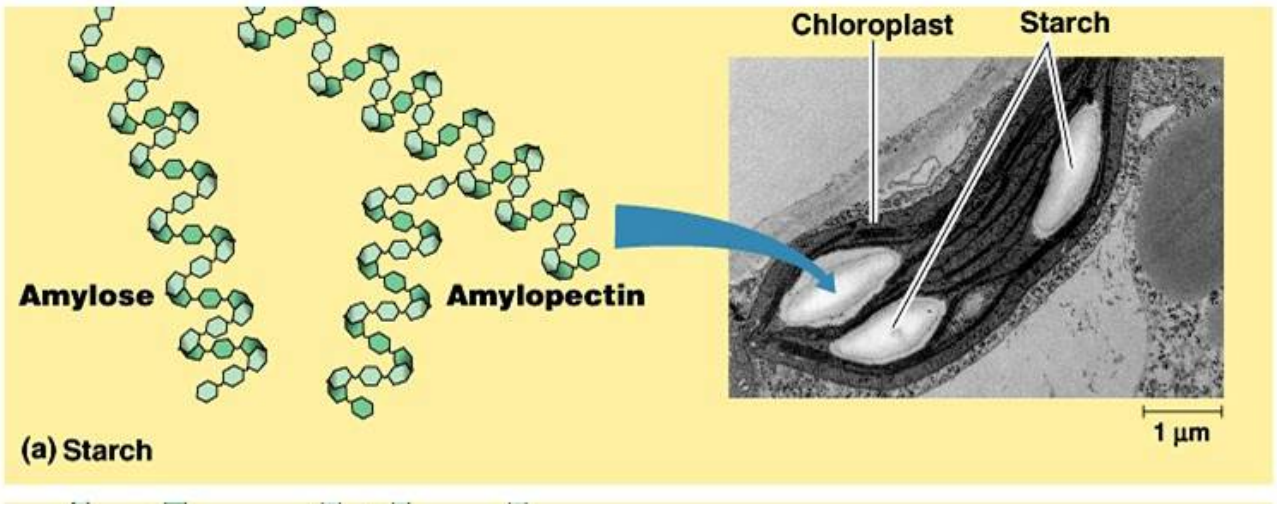
Digestion des glucides

- Glucides structuraux : **la pectine**
  - **Polymères de polysaccharides acides** (sucres oxydés)
  - Composés d'une chaîne principale de molécules **d'acide uronique (acide galacturonique)** liées en beta1-4
  - Régulièrement entre ces monomères s'intercalent des molécules de **rhamnoses**
  - **Très facilement digérée** par les microorganismes du rumen



Digestion des glucides

- Glucides non structuraux : **l'amidon**
  - **Polymère du glucose** avec des liaisons de **type α1-4**
    - **Amylose** = polymère
    - **Amylopectine** = polymère avec **ramification en 1-6** tous les 24 à 30 glucoses
  - Principale forme de **réserve énergétique** des végétaux

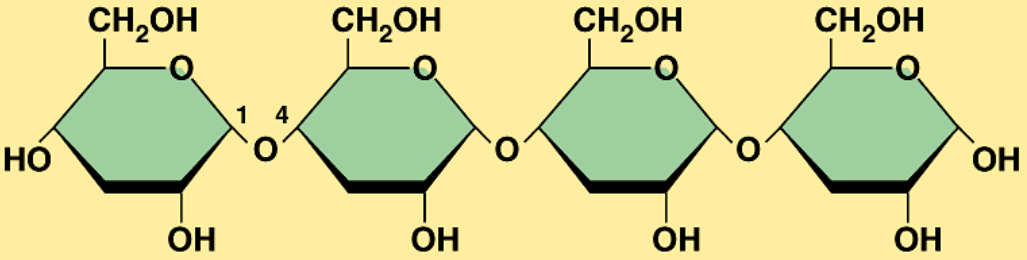


Les mammifères produisent des enzymes capables de cliver des liaisons α1

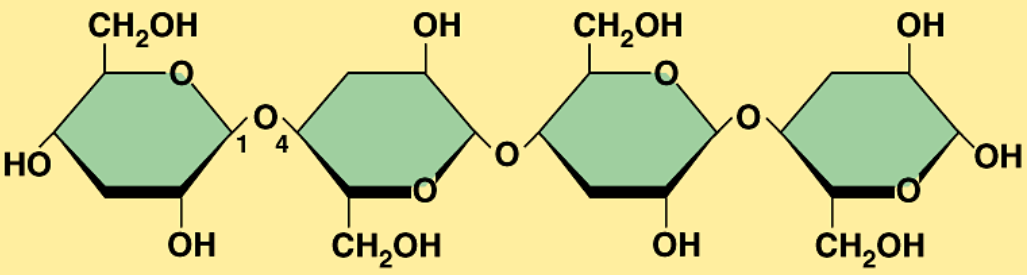
Digestion des glucides

- Glucides non structuraux : **l'amidon**

Comparaison amidon/cellulose



Amidon : liaisons α1-4



Cellulose : liaisons β1-4

Digestion des glucides

- Glucides non structuraux : **l'amidon**
  - Digestion enzymatique par des **bactéries amylolytiques et certains protozoaires**
    - **α-amylase** libérée dans le jus de rumen découpe les chaînes d'amidon en **polyholoside**s puis en **maltose** (2 glucoses)
    - **iso-amylases** (dextrinases) intrabactériennes rompent les liaisons de ramification 1-6
    - pH optimum = 5.5 - 6.6
    - Métabolisation rapide / croissance rapide
    - Ratio C2 : **C3** : C4 = 60 : **30** : 10

Digestion des glucides

- Glucides non structuraux : **l'amidon**
  - Digestion enzymatique
    - Une partie de l'amidon échappe à la digestion ruminale pour être digéré dans l'IG grâce aux **amylases pancréatiques**

      pas d'amylase salivaire chez les ruminants

    - Fraction non digérée dépend de l'origine de l'amidon
      - 5 à 10% pour le blé
      - 10 à 20% pour le maïs
      - 50% pour le sorgho (riche en tanins)

    - Fraction non digérée augmente quand la quantité ingérée augmente

Digestion des glucides

- Glucides non structuraux : **les sucres solubles**
  - Fructosanes
    - Polymères de fructoses avec des liaisons β1-2

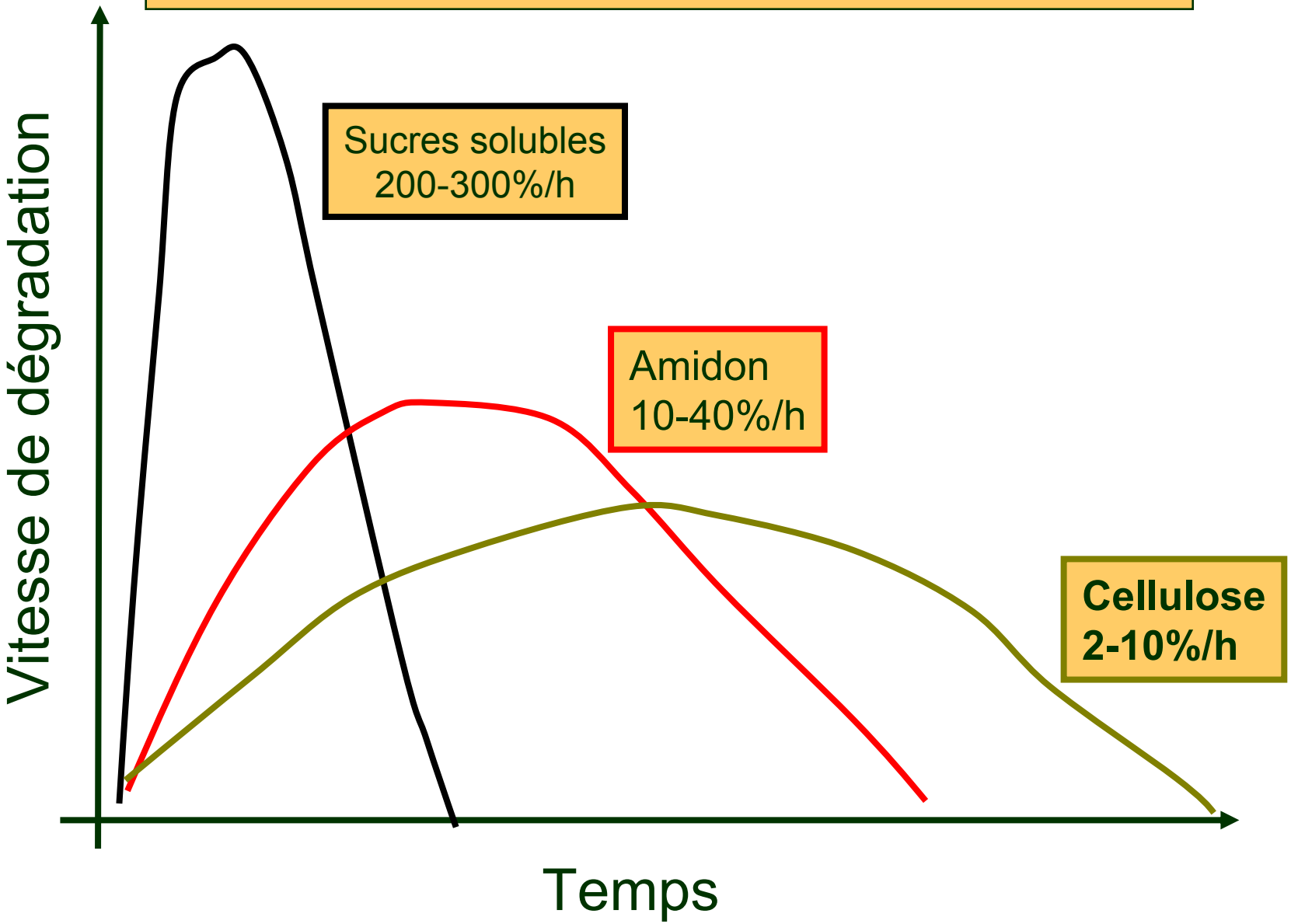
      Ex: inuline
    - Indigestible par les enzymes des mammifères
    - Permettent le stockage d'énergie dans certaines plantes (chicorée, topinambour)

Digestion des glucides

- Glucides non structuraux : **les sucres solubles**
  - Les fourrages verts contiennent de **3 à 10 % de sucres solubles**
    - Taux plus élevé dans les tiges que les feuilles
    - **Rapidement dégradés en hexoses**, surtout utilisés par les protozoaires

    Exemple : la betterave contient 16% de saccharose

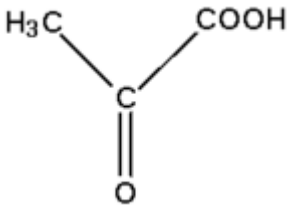
Vitesse de digestion ruminale (% par h)



Digestion des glucides

- **Les sucres simples**
  - Sont absorbés par les bactéries
  - Donnent des **pyruvates** par la voie **d'Emden-Meyerhof**

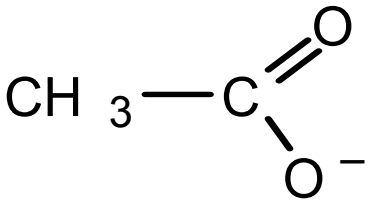
D-glucose + 2 NAD^+ + 2 ADP + 2 Pi ⟶ 2 Pyruvate + 2 NADH + 2 ATP + 2 H^+

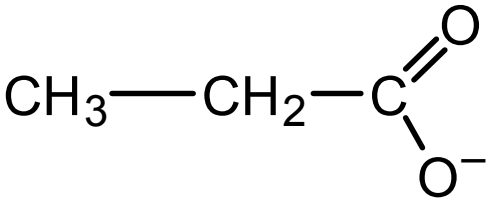


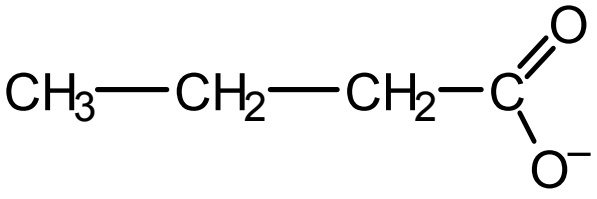
  - Les pyruvates participent ensuite à la formation des **AGV: acétate / propionate / butyrate selon le faciès bactérien**

Les Acides Gras Volatils : AGV

Les 3 principaux AGV







acétate (2C)

75 %

propionate (3C)

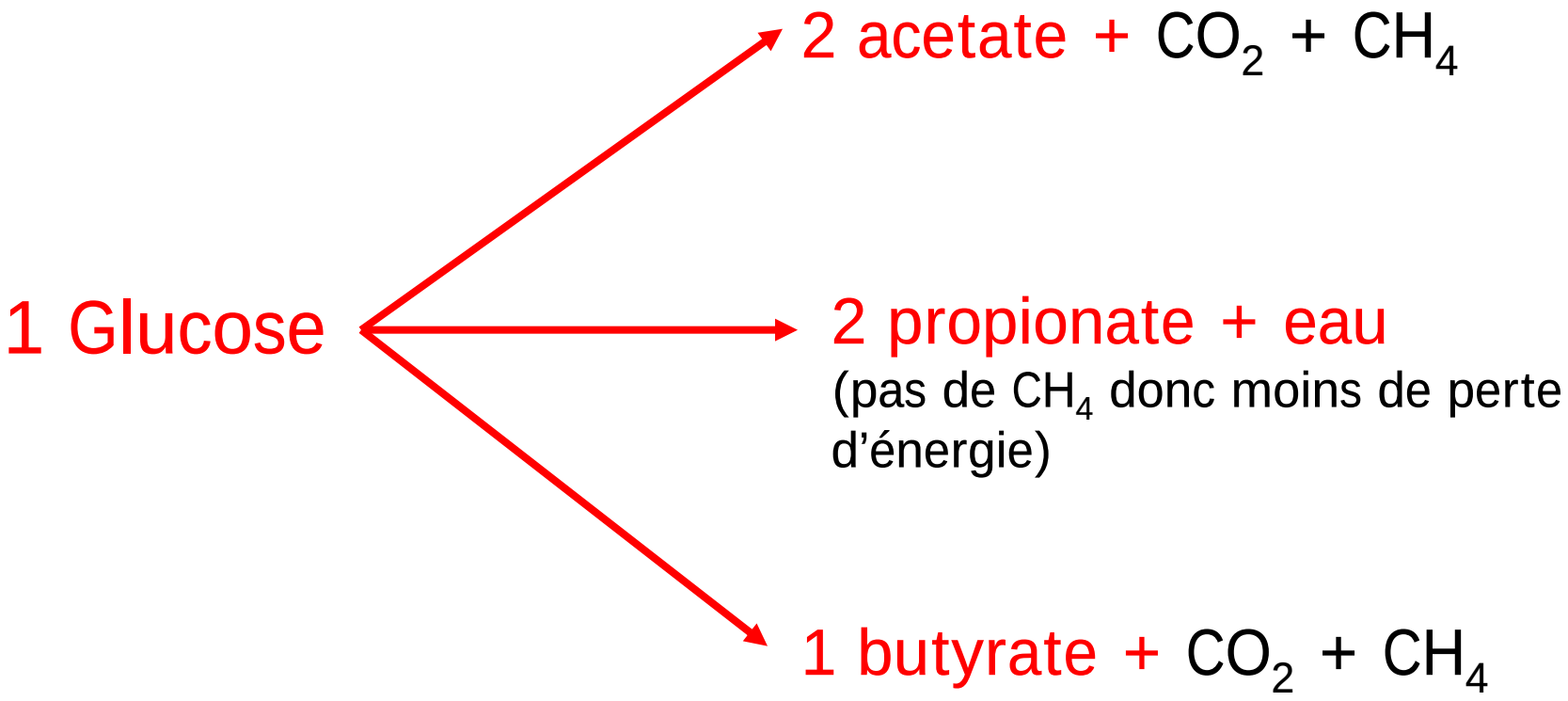
15 %

butyrate (4C)

10 %

Leur proportion dépend du régime alimentaire

Les Acides Gras Volatils : AGV



Les Acides Gras Volatils : AGV

Fourrage : Grain	Acetate	Propionate	Butyrate
100:0	**75**	**15**	**10**

Les Acides Gras Volatils : AGV

Fourrage : Grain	Acetate	Propionate	Butyrate
100:0	**71**	**16**	**8**
20:80	**54**	**35**	**11**

Les Acides Gras Volatils : AGV

Fourrage : Grain	Acetate	Propionate	Butyrate
100:0	**71**	**16**	**8**
75:25	69	18	8
50:50	65	20	10
40:60	60	26	10
20:80	**54**	**31**	**11**

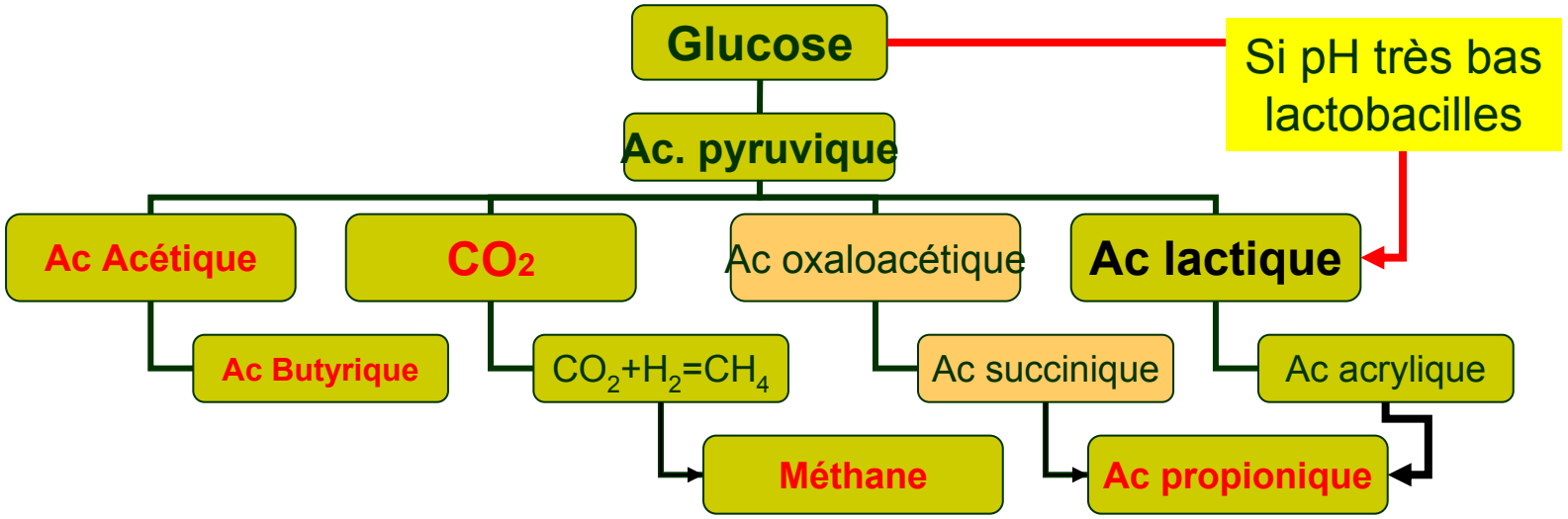
Facteurs modifiant la production d'AGV

- Production massique
  - Bovins : 3 kg/j ; Ovins : 300 g/j

- **Prise de nourriture** (PN): Pic de production 4 h après la PN

- **Régime alimentaire**
  Globalement ce qui diminue C2 et CH_4, augmente C3 et vice versa
  - **Diminution des fourrages et augmentation des concentrés**
    - diminuent la production de C2
    - augmentent la production de C3
  - **Granulation, meulage**
    - diminue C2 et CH_4
    - augmente C3

Digestion des glucides



Formation de l'acide propionique

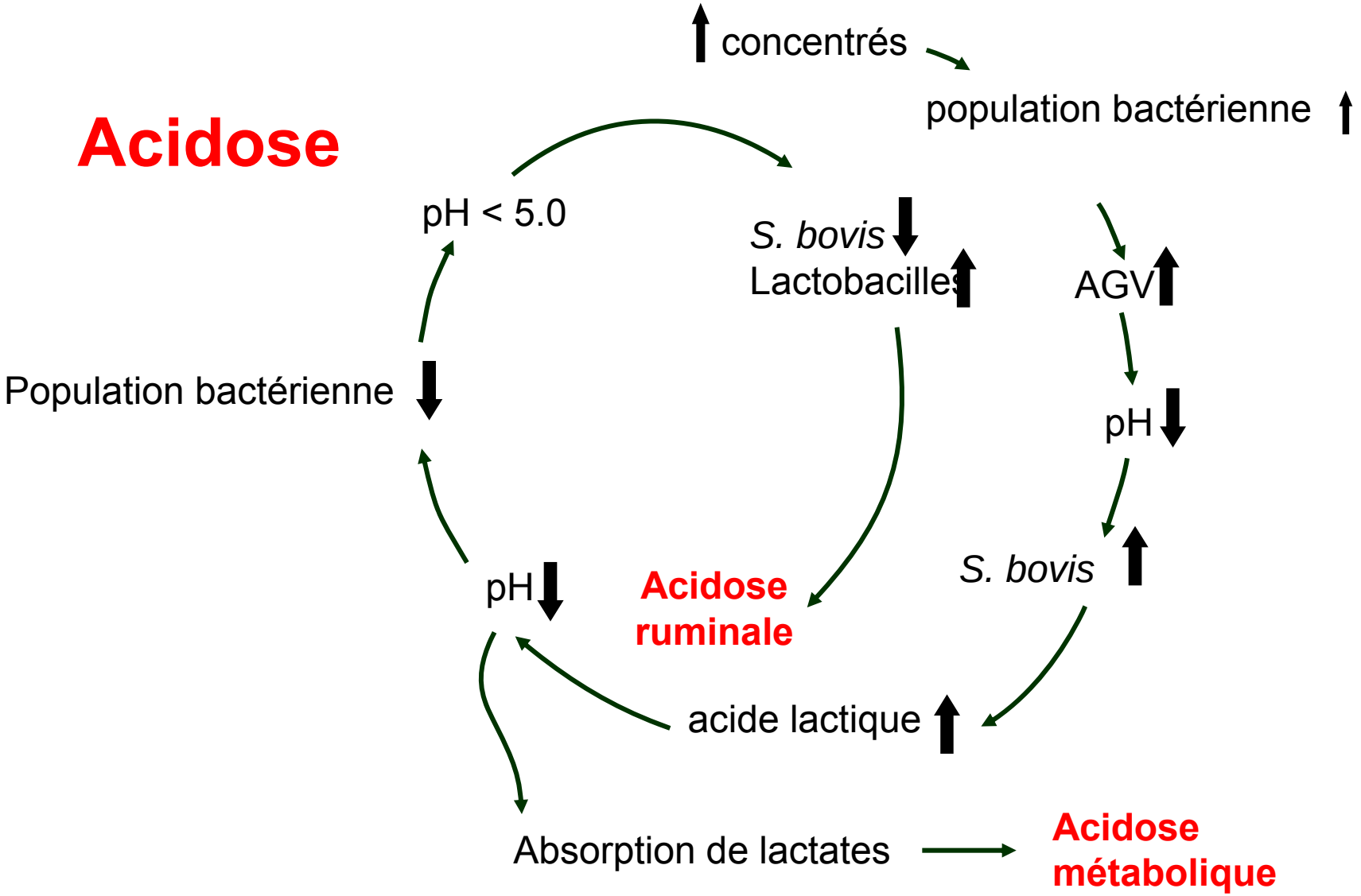
Voie succinique:
pH>5.8
Régime cellulose
Propionobactéries

Voie acrylique
pH<5.5
Régime céréales
Streptococcus bovis
Si pH encore plus bas, développement des lactobacilles

Digestion des glucides

- Formation des lactates
  - **Pas d'accumulation** des lactates consommés par la voie acrylique dans les conditions physiologiques
  - Rapidement **transformés en propionate** (de 55 à 90%)
  - Représentent **1% des acides qui seront absorbés** par la paroi du RR
  - **Risque d'acidose**

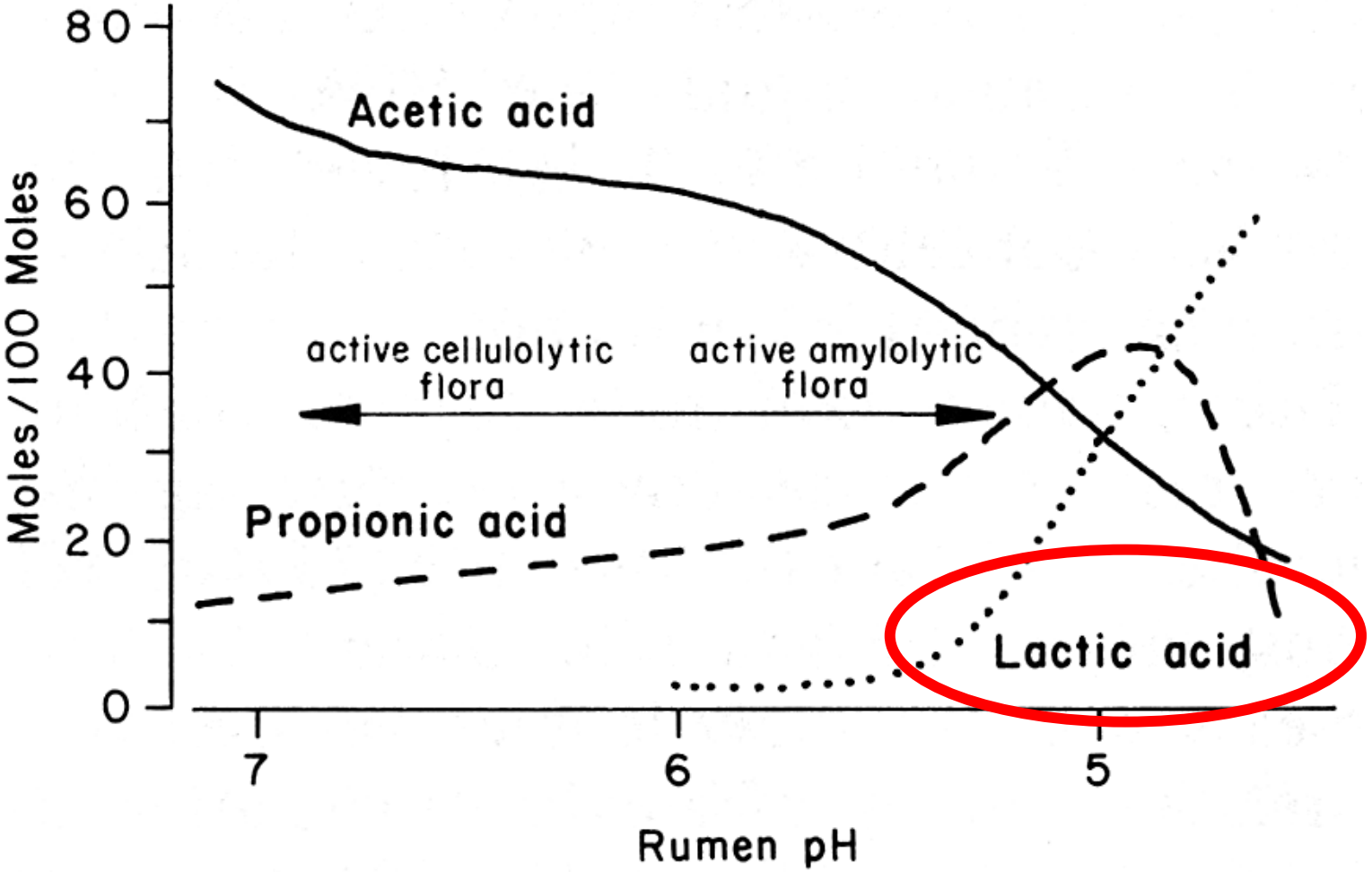
Acidose



Nocek, jds 80:1005

Digestion des glucides

pH ruminal et production d'AGV



Facteurs liés au risque d'acidose

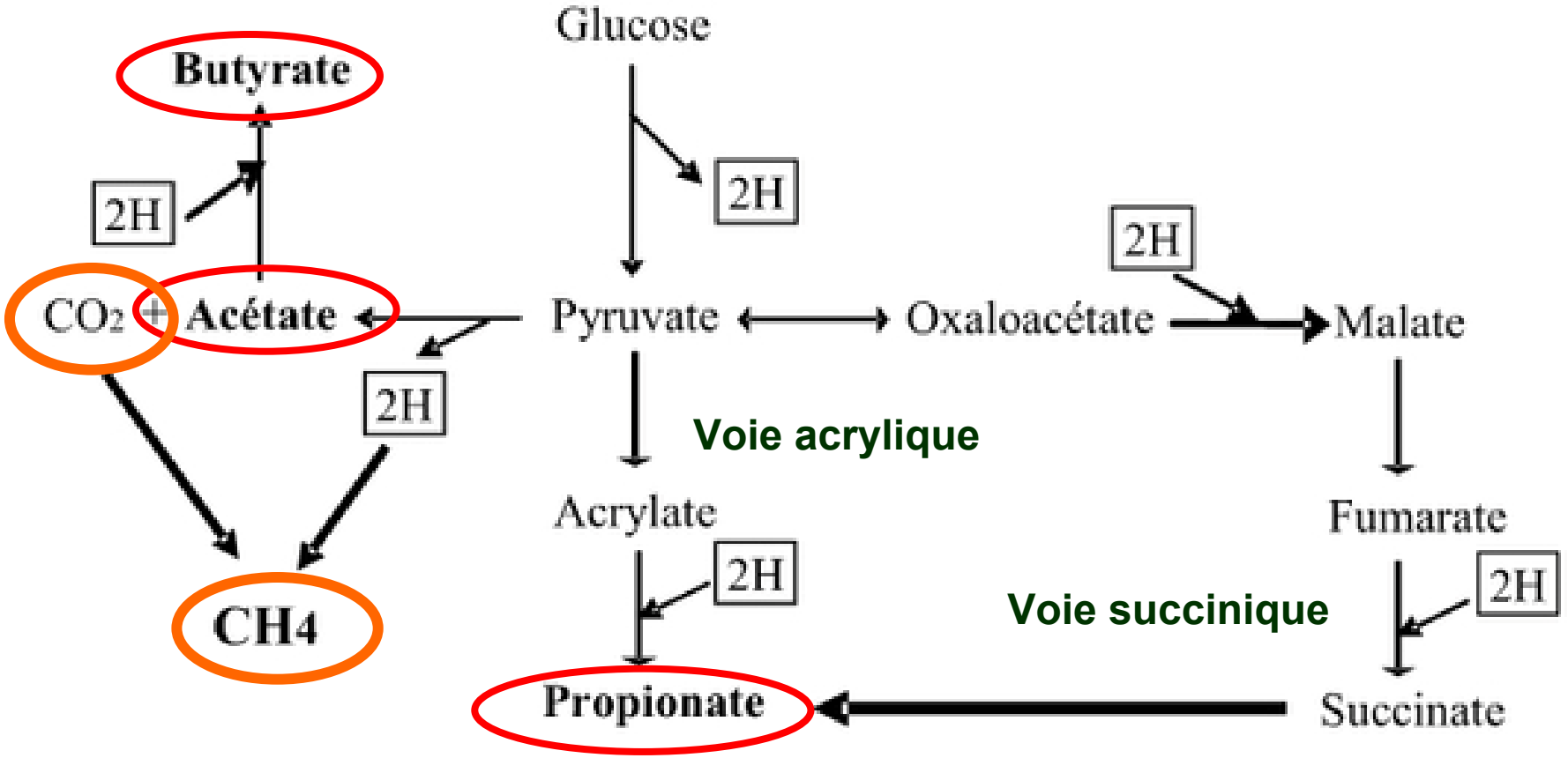
- Modifications de la ration alimentaire
  - concentrés > fourrages
- Modifications du pH
  - AGV : production / absorption
  - Diminution de la sécrétion salivaire suite à une réduction de la mastication et des stimuli ayant pour origine le RR

Acidose : symptômes

- **Arrêt des contractions ruminales**
- **Diarrhée**
- Lait : diminution de la quantité et de la qualité

- Autres conséquences dues à l'accumulation de toxiques
  - Troubles locomoteurs (fourbure, pododermatite,..)
  - Entérotoxémie
  - Inflammation de la paroi ruminale
  - Abcès hépatiques
  - Nécrose du cortex cérébral

Digestion des glucides



Production de CO_2 et de CH_4 lors de la synthèse d'acétate et de butyrate

Digestion des glucides

- Formation de gaz : CO_2 et méthane (CH_4)
  - Production totale pouvant atteindre **600 L/J**
  - CO_2 vient majoritairement de la **décarboxylation** de l'acide pyruvique en **acétate**
  - CO_2 peut être utilisé pour former
    - l'acide oxaloacétique (carboxylation)
    - **du CH_4 Voie principale**: $4H2 + CO2 = CH4 + 2H2O$

    Methanobacterium formicum, Methanobacter ruminantium

Bilan énergétique de la digestion microbienne

Substances	% énergie
AGV	**49-58**
Chaleur	**6-12**
Gaz	**4-8**
Matière microbienne synthétisée	**26-32**

Les Acides Gras Volatils : AGV

- Production de méthane
  - Gaz sans intérêt pour les ruminants et éliminé par éructation
  - Dépense énergétique inutile
  - Gaz à effet de serre

Contribution à la production de CH_4

Sources	nature	% total	% anthropique
Naturelles	Marais	24.4	
~33%	autres	9.5	
Industrielles	Pétrole	10.6	16.1
	Charbon	10.3	16
	Décharge	6.4	9.6
~33%	Épuration eaux	5.3	8
Agriculture	Riz	12.8	19.3
	Bétail	**17**	**25.8**
	Fumier	2.1	3-7
33%	brûlis	1.0	1.6

Les Acides Gras Volatils : AGV

- Production de méthane
  - Réduction de la production par modification du régime alimentaire
    - **Réduction de la part des fourrages et augmentation de celle des céréales dans la ration**
    - Granulation :
      - Diminue le temps de séjour dans le rumen et le temps de rumination
      - Diminution de la salivation et de l'arrivée dans le rumen de bicarbonates ce qui diminue le pH
      - La diminution du pH réduit la flore cellulolytique et donc la production d'acétate et de CH_4

Les Acides Gras Volatils : AGV

- Production de méthane
  - Réduction de la production par l'utilisation d'**ionophores** (ex: monensin)

    =Orientation de la flore bactérienne vers des populations **produisant de l'acide propionique**

Les Acides Gras Volatils : AGV

- **Absorption par les papilles épithéliales**
  - **Rumen : 88%**
  - Omasum :12%
  - Vitesse d'absorption
    - C4 > C3 > C2
    - Forme non ionisée (acide)> forme ionisée (anion)
  - Diffusion ou diffusion facilitée (anion avec un échange de HCO_3^-) à travers la membrane
  - Mécanisme de l'absorption
    - AGV sous forme ionisée car pKa $\leq$ 4.8
    - Ions H^+ fournis par l'hydratation du CO_2 permet de les neutraliser dans la paroi

Les Acides Gras Volatils : AGV

- **Absorption par les papilles épithéliales**
  - Projections de l'épithélium : multiplient par 20 la surface du rumen
  - Taille et forme modifiées par la ration alimentaire : le **développement des papilles exige des AGV** (butyrate)

Les Acides Gras Volatils : AGV

- **Développement des papilles épithéliales chez le veau**
  - Stimuli chimiques
    - **Production d'AGV** (butyrate)
  - Stimuli mécaniques
    - La consommation de fourrage et le **frottement** contre la paroi permet le développement des papilles

Les Acides Gras Volatils : AGV

- Métabolisme des AGV
  - **Butyrate :** métabolisé en β-hydroxy butyrate dans la paroi du rumen ou dans le foie

    ⇨ permet la production des **C4-C16 du lait**

  - **Acétate** : pas de métabolisme dans la paroi du rumen gagne directement le sang et le foie

    ⇨ source d'**énergie**
    permet la production des **C4-C16 du lait**
    permet la formation de **graisse**

  - **Propionate** est partiellement transformé en lactates dans la paroi du RR

    ⇨ permet la production de **glucose**
    propionate dans le foie donne de l'oxaloacétate

Les Acides Gras Volatils : AGV

- Gagnent le foie via la circulation portale
- Apportent **60-80% de l'énergie alimentaire**

Digestion des lipides

- **Peu de lipides** dans le régime herbivore
  - 200 g/j chez un bovin; 30 g/j chez le mouton
  - Matière végétale: 2 à 5 % de MG
    - **Galactolipides** = 1 AG est remplacé par un galactose
    - **Triglycérides** dans les **graines oléagineuses**
    - **Phospholipides**
    - Les AG sont **largement insaturés** (80%) sous forme cis (sous forme trans chez les bactéries)

Remarque : homme catabolise surtout du cis

Digestion des lipides

- **Hydrolyse complète** des galactolipides
  - Lipase bactérienne (2/3) et protozoaires (1/3)
  - Glycérol et galactose donnent des **AGV**

- **Saturation** (hydrogénation) des AG insaturés
  - Acceptent les H^+ libérés lors de l'oxydation anaérobie
  - La saturation concerne également les β-carotènes (risque de carence en vitamine A)
  - Pas intéressante au point de vue alimentaire (lait par ex)
  - Les protozoaires en stockant des AG non saturés peuvent les protéger de la saturation

- Synthèse de **lipides bactériens** à partir des AGV

Digestion des lipides

- **Digestion et absorption** dans l'intestin identiques à celles des mammifères monogastriques

Digestion des protéines

- Besoin de 350 g/j de Matière Azotée Digestible chez une vache à l'entretien

- **Protéines végétales**
  - **Solubles (60%) :** essentiellement localisées dans les chloroplastes
    - Immédiatement libérées et utilisées par les bactéries avec une **protéolyse totale (en 2h)**
  - **Insolubles (40%) :** organites intracellulaires comme les mitochondries, membranes…
    - Libérées progressivement avec la dégradation des glucides structuraux
    - Les protéines **liées à la cellulose sont inutilisables** par les microorganismes et quittent le RR pour gagner l'IG

Digestion des protéines

- **Protéines**
  - Non dégradables (tanins, mais) : hydrolyse intestinale
  - Dégradables :
    - Les **bactéries protéolytiques** hydrolysent **50 %** des protéines du rumen en aa et NH3
      (protéolyse extracellulaire puis intracellulaire)
    - Les aa peuvent **être utilisés** par les microbes (**synthèse de protéines microbiennes**) ou être **dégradés en NH_3 et AGV**

S'il y a trop de protéines/ apport énergie, la production de NH_3 va être élevée et pour éviter une toxicité, le NH_3 va être converti en urée dans le foie

⇨ Perte d'énergie

Utilisationde l'azote non protéique (ANP)

- Les ruminants peuvent tirer profit de l'azote non protéique
  = Apport possible d'**urée** qui contient 47% d'azote

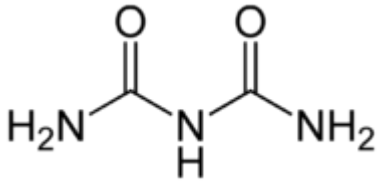
⇨ 150 g d'urée est l'équivalent théorique de 1 kg de soja

- ANP est la **principale source d'azote** des bactéries

- ANP est abondant dans les ensilages (fermentation par les bactéries), la betterave…

Utilisation de l'azote non protéique (ANP)

- **Utilisation de l'urée**
  - Hydrolyse rapide par les uréases bactériennes (**35% des bactéries du rumen** ont cette capacité)
    - Vitesse d'hydrolyse très rapide en NH_3
    - Vitesse d'utilisation de NH_3 plus lent ce qui limite l'utilisation de l'urée car **NH_3** peut traverser la paroi du RR et **intoxiquer l'animal (alcalose)**
      - Enrobage de l'urée
      - Biuret



Remarque : Les protozoaires n'ont pas cette capacité

Utilisation de l'azote non protéique (ANP)

- Le cycle **rumino-hépato-salivaire** de l'urée
  - Produite par le foie
  - Éliminée par le rein
    - Clairance rénale adaptée à l'apport azoté ce qui épargne l'azote (chameau)
  - Retour vers le RR
    - Par la salive
    - Par **diffusion par la paroi du RR (majoritaire)**

Digestion des protéines

- **Acides aminés absorbés** au niveau de l'intestin proviennent de la digestion intestinale de protéines issues :
  - De l'**alimentation** lorsqu'elles sont non dégradables par les bactéries
  - De la **digestion des bactéries** du rumen

Synthèses bactériennes

- Synthèse d'AA à partir d'ANP
- Synthèse d'AA essentiels (limité pour méthionine)
- Synthèse de vitamines
  - Vitamines du groupe B
    - Nécessité de Cobalt pour la synthèse de la vitamine B12

Conclusion

- Digestion très différente des monogastriques
- Milieu ruminal adapté à la fermentation microbienne
  - Anaérobie
  - Volume
  - Température
  - pH,…
- Populations microbiennes permettent
  - Digestion de glucides structuraux
  - Synthèse d'acides aminés à partir d'azote non protéique
  - Saturation des lipides (défavorable)
- Absorption d'AGV au niveau du rumen