



Digestion et absorption dans l'intestin grêle

Aude FERRAN

2023

Introduction

- Ingestion de grosses molécules non absorbables
- Absorption de nutriments
 - Glucose, fructose, galactose,...
 - Acides aminés, dipeptides, tripeptides
 - Acides gras
 - PAS d'absorption** amidon, glycogène, protéines
- Sites majeurs de digestion
 - **intestin grêle** chez toutes les espèces
 - **réticulo-rumen** chez les ruminants
 - **gros intestin pour la cellulose** chez les herbivores monogastriques (cheval, lapin)

Introduction

■ Absorption

□ majoritairement au niveau de **l'intestin grêle**

■ Grande surface favorise cette absorption

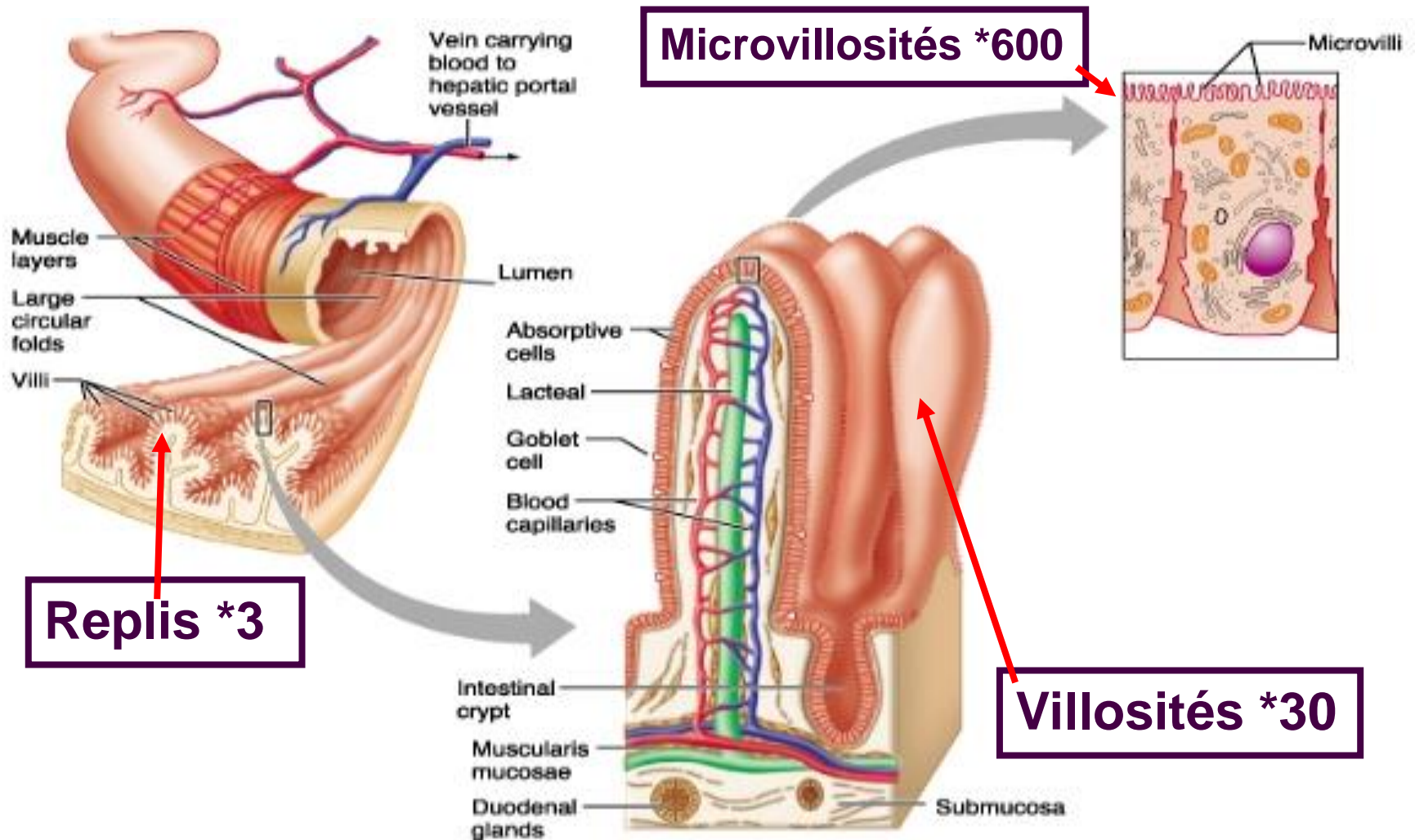
□ Replis,

□ Villosités,

□ Microvillosités

■ Turn-over rapide des cellules (3 à 6 j chez l'Homme)

Introduction





Introduction

■ Absorption

	Longueur cm	Surface d'absorption (m ²)
Bouche	15-20	0.07
oesophage	25	0.02
Estomac	25	0.11
Duodenum	25	0.09
Jéjunum	300	60
Iléon	60	60
Caecum	10	0.05
Côlon	150	0.15
Rectum	20	0.015

Plan

- Digestion et absorption des glucides
 - **Digestion**
 - Pré-intestinale
 - **Intestin grêle**
 - Enzymes pancréatiques
 - Enzymes de la bordure en brosse
 - Gros intestin
 - **Absorption**

- Digestion et absorption des protéines
 - **Digestion**
 - Pré-intestinale
 - **Intestin grêle**
 - Enzymes pancréatiques
 - Enzymes de la bordure en brosse
 - Enzymes intracellulaires
 - **Absorption**

- Digestion et absorption des lipides



Digestion et absorption des glucides

Digestion & Absorption des glucides

Glucides

**Enzymes
digestives**

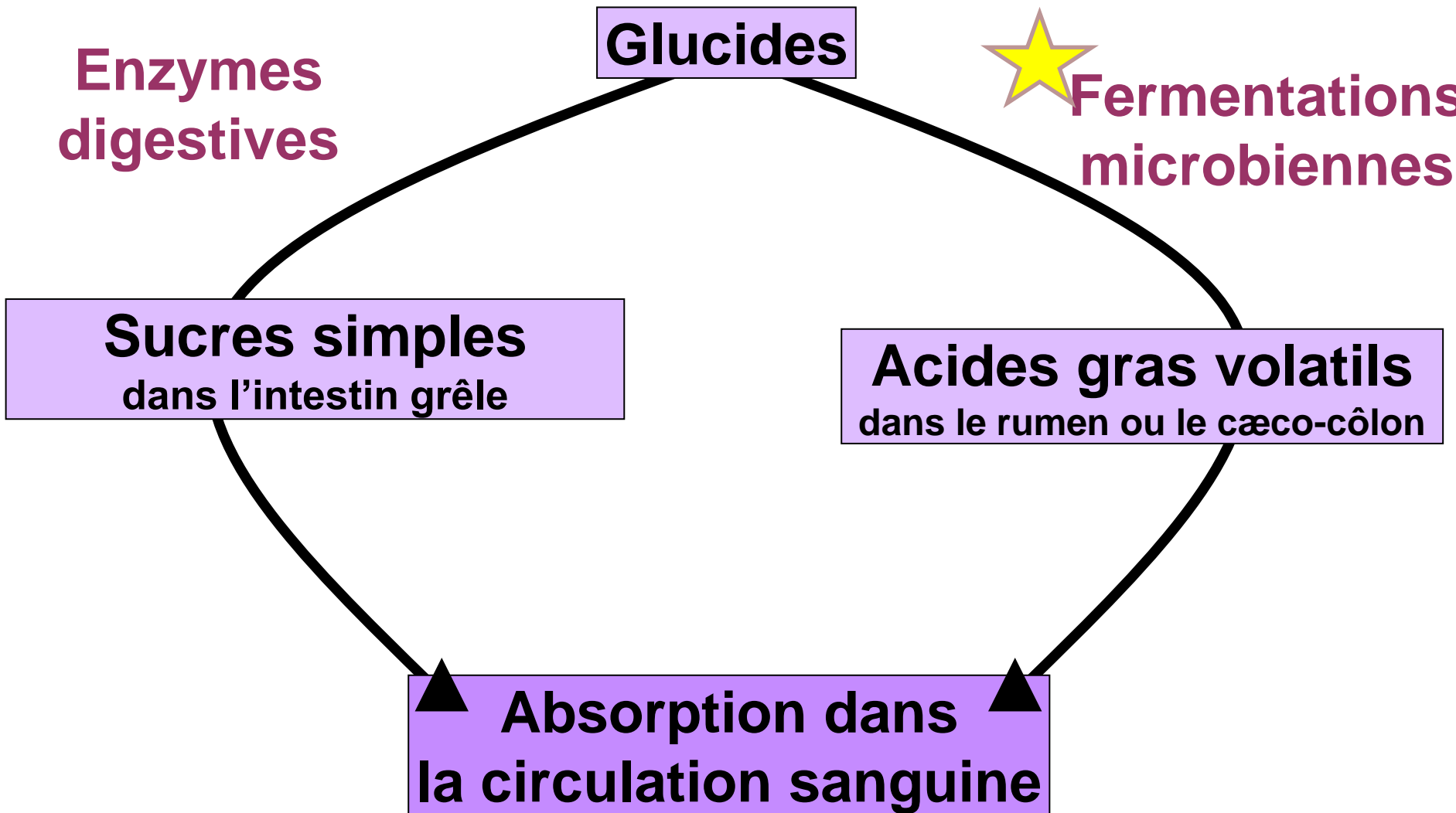


**Fermentations
microbiennes**

Sucres simples
dans l'intestin grêle

Acides gras volatils
dans le rumen ou le cæco-côlon

**Absorption dans
la circulation sanguine**

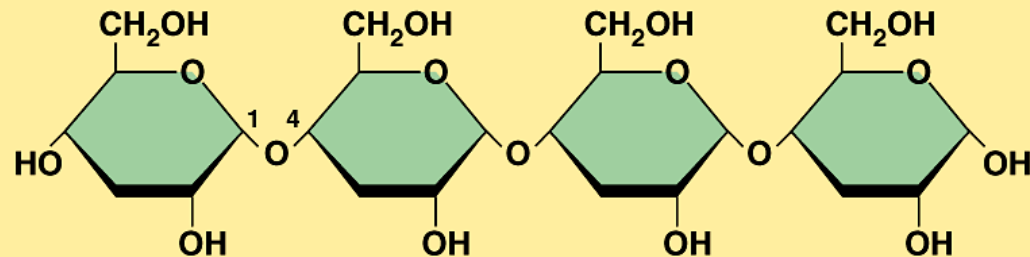
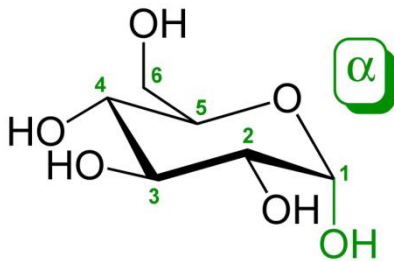


Digestion des glucides

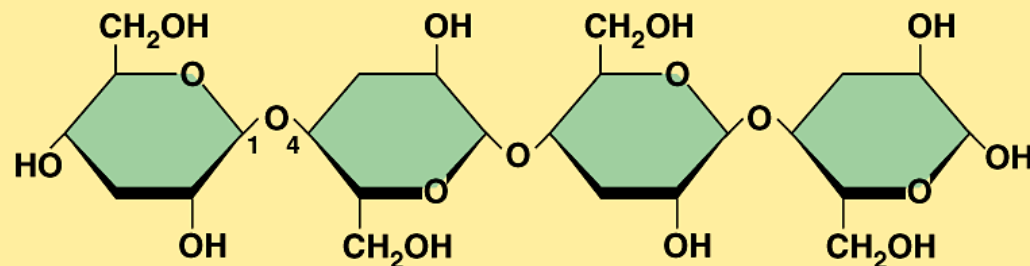
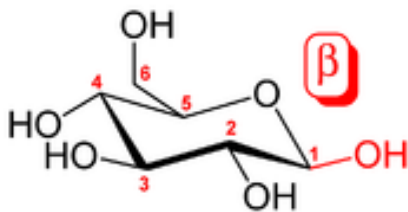
- Alimentation principalement composée de **polysaccharides** (amidon, cellulose, ...) et de **disaccharides** (saccharose, lactose).
- **Seuls les monosaccharides** (glucose, fructose, galactose) **peuvent être absorbés** par les entérocytes ce qui requiert une digestion complète.

Digestion des glucides

- **Absence d'enzymes** capables de digérer des polysaccharides avec des **liaisons β -glucose** (cellulose, hémicellulose,...) **chez les mammifères**



Amidon : liaisons α 1-4



Cellulose : liaisons β 1-4

Digestion des glucides

Les liaisons β ne peuvent être hydrolysées que par des **enzymes bactériennes** présentes dans le **gros intestin** chez toutes les espèces ou dans le **réticulo-rumen** chez les ruminants

La cellulose et les autres fibres ont **principalement un rôle dans le transit intestinal** chez les mammifères carnivores et omnivores

Digestion des glucides

■ Digestion pré-intestinale

- Dans la cavité buccale et estomac proximal
 - Amylase salivaire permet de digérer **chez l'Homme (ABSENTE chez la plupart des animaux)** environ **70%** de l'amidon. (Elle est inactivée dès que le pH est <4.5)

- Dans le réticulo-rumen, digestion des glucides **et autres molécules** chez les ruminants

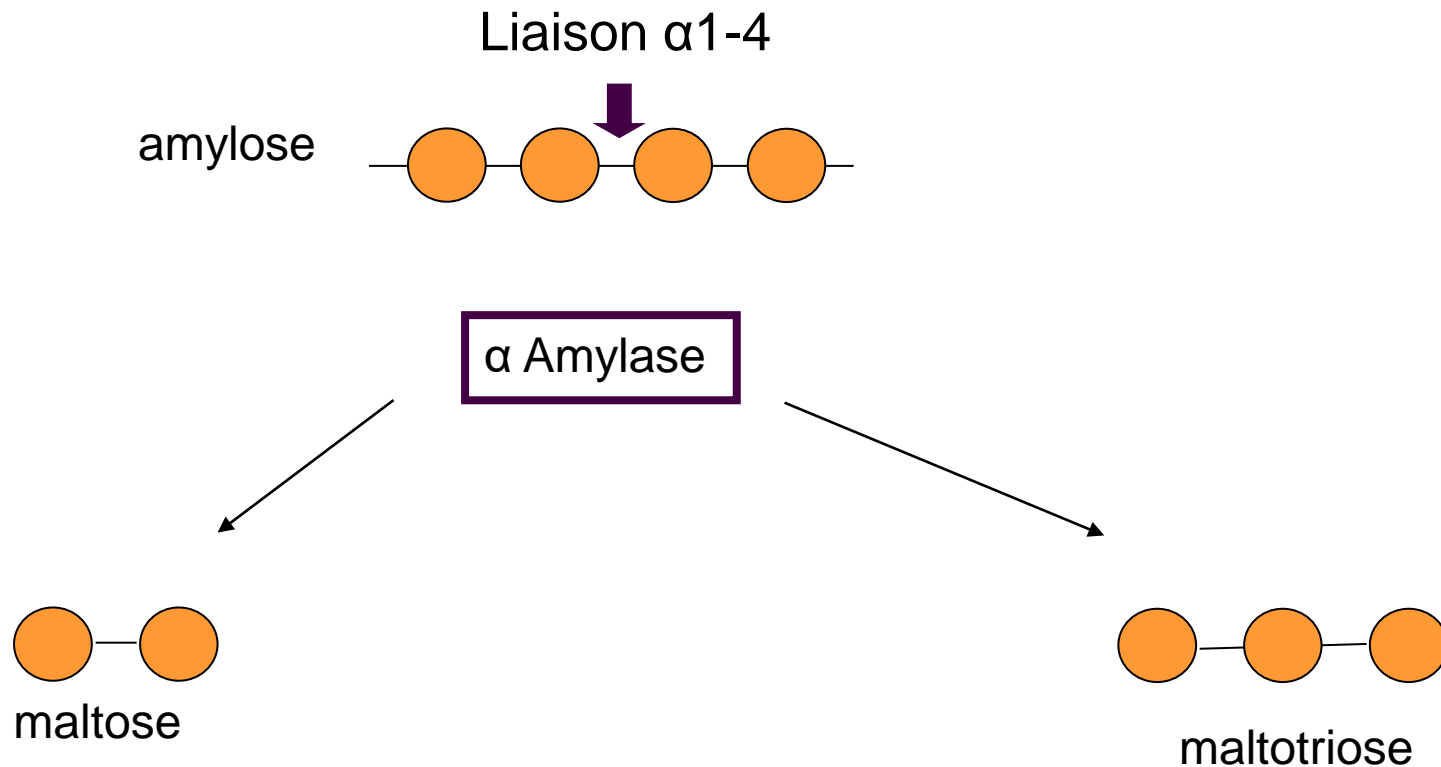
Digestion des glucides

■ Digestion intestinale

- 1. dans la lumière : **amylase pancréatique**
 - digestion très rapide (plus puissante que l'amylase salivaire)
 - l'amidon ingéré est digéré en totalité en 30 minutes dans le duodénum

Digestion des glucides

- α Amylase :
 - Hydrolyse les **liaisons $\alpha 1-4$** de l'amidon

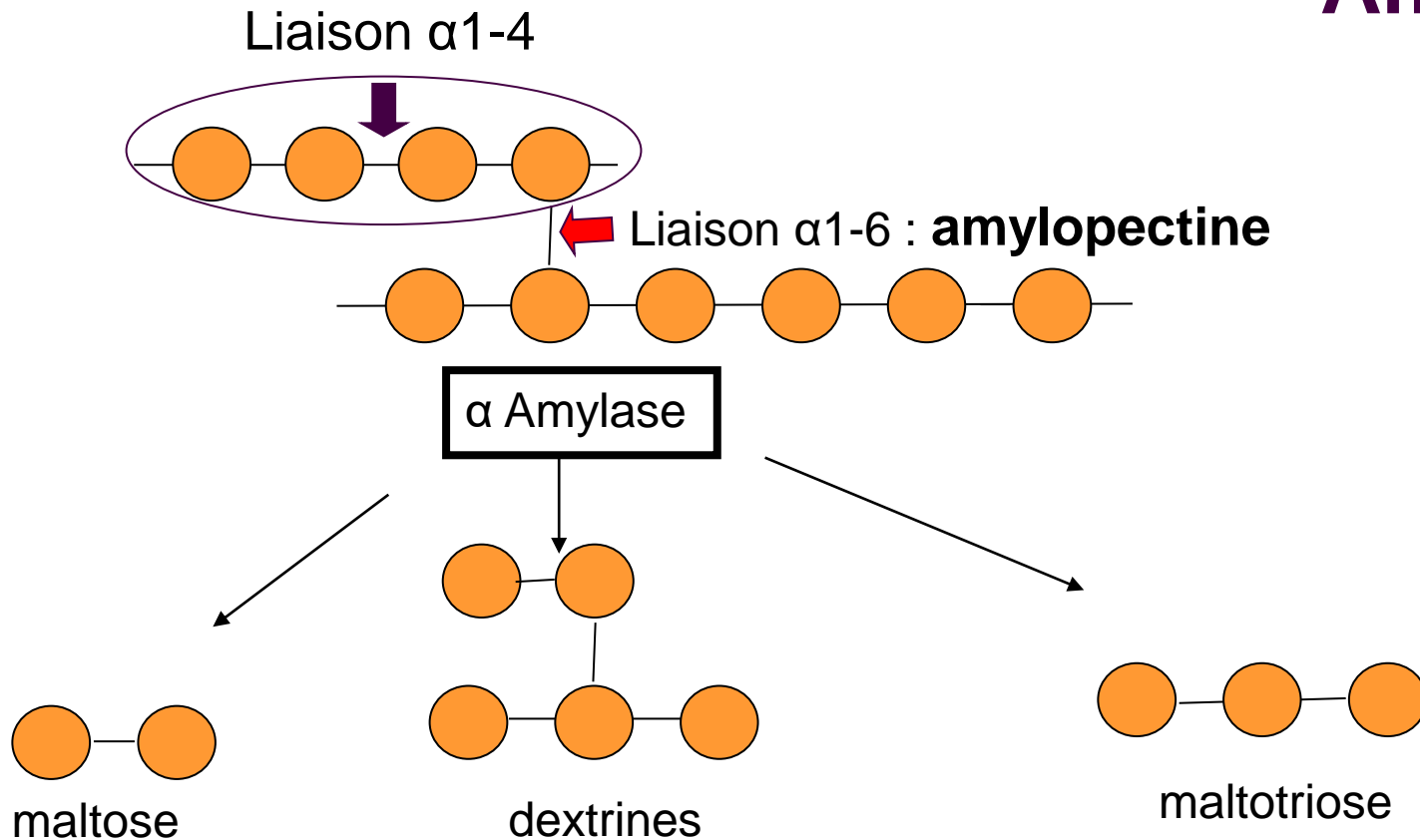


Digestion des glucides

■ α Amylase :

- Hydrolyse les **liaisons α 1-4** de l'amidon

Amidon



Digestion des glucides

■ Digestion intestinale

□ 1. dans la lumière :

➡ **amylase** pancréatique => Maltose, maltotriose, dextrines à partir amidon

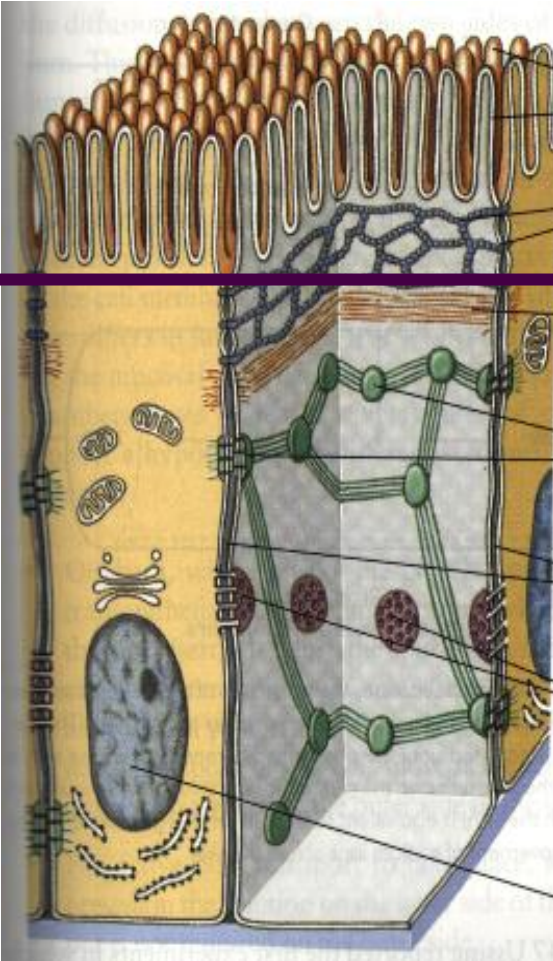
Lactose, saccharose **non hydrolysés**

□ 2. au niveau de la bordure en brosse : **oligosaccharidases**
produites par les entérocytes

Enzymes digestives de la
bordure en brosse
produites par les entérocytes

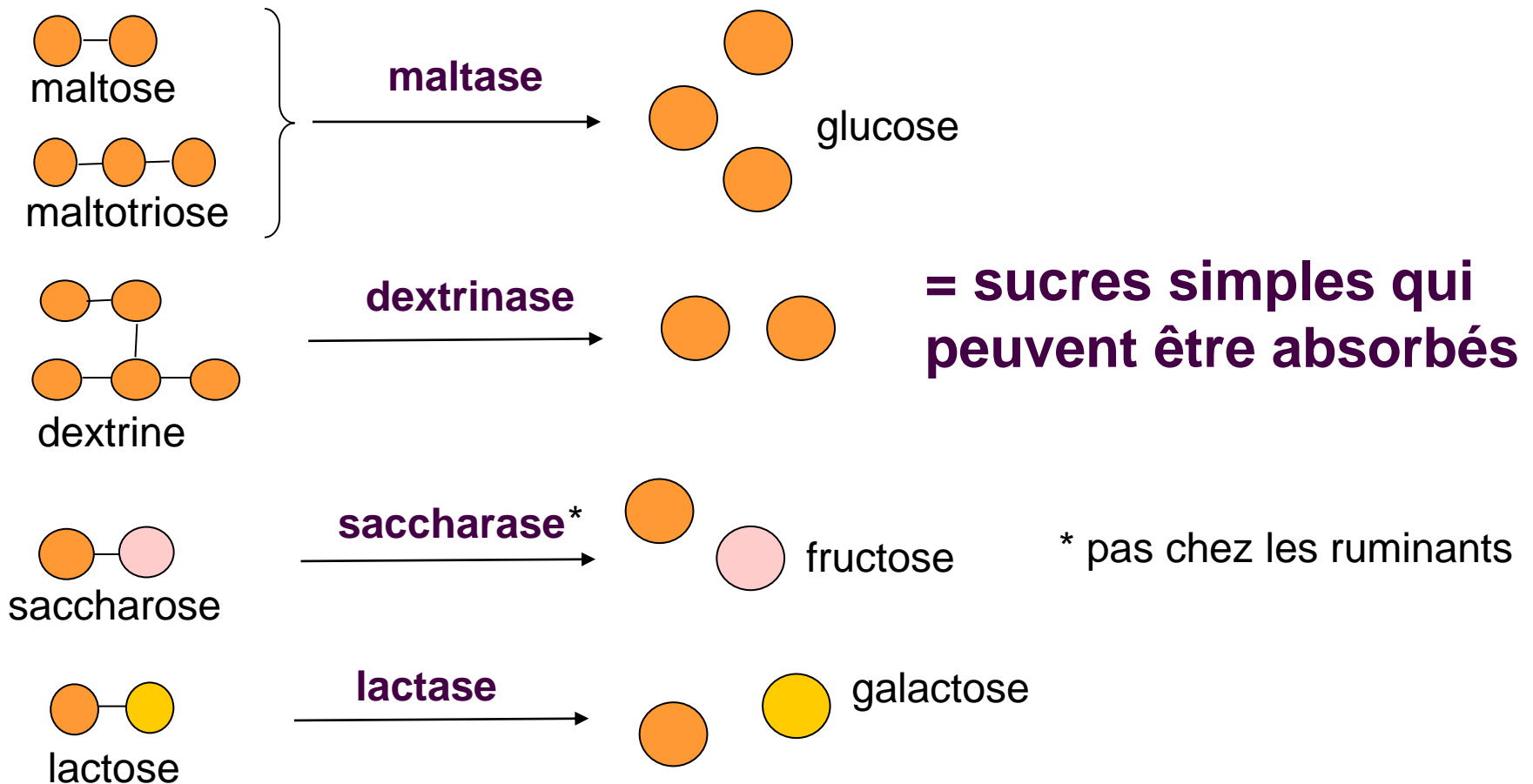


- Oligosaccharidases
- Dipeptidases, Aminopeptidases
- Monoglycéride lipase
- Nucléotidases, nucléosidases



Digestion des glucides

■ Oligosaccharidases



Digestion des glucides

■ Digestion intestinale

□ 1. dans la lumière :

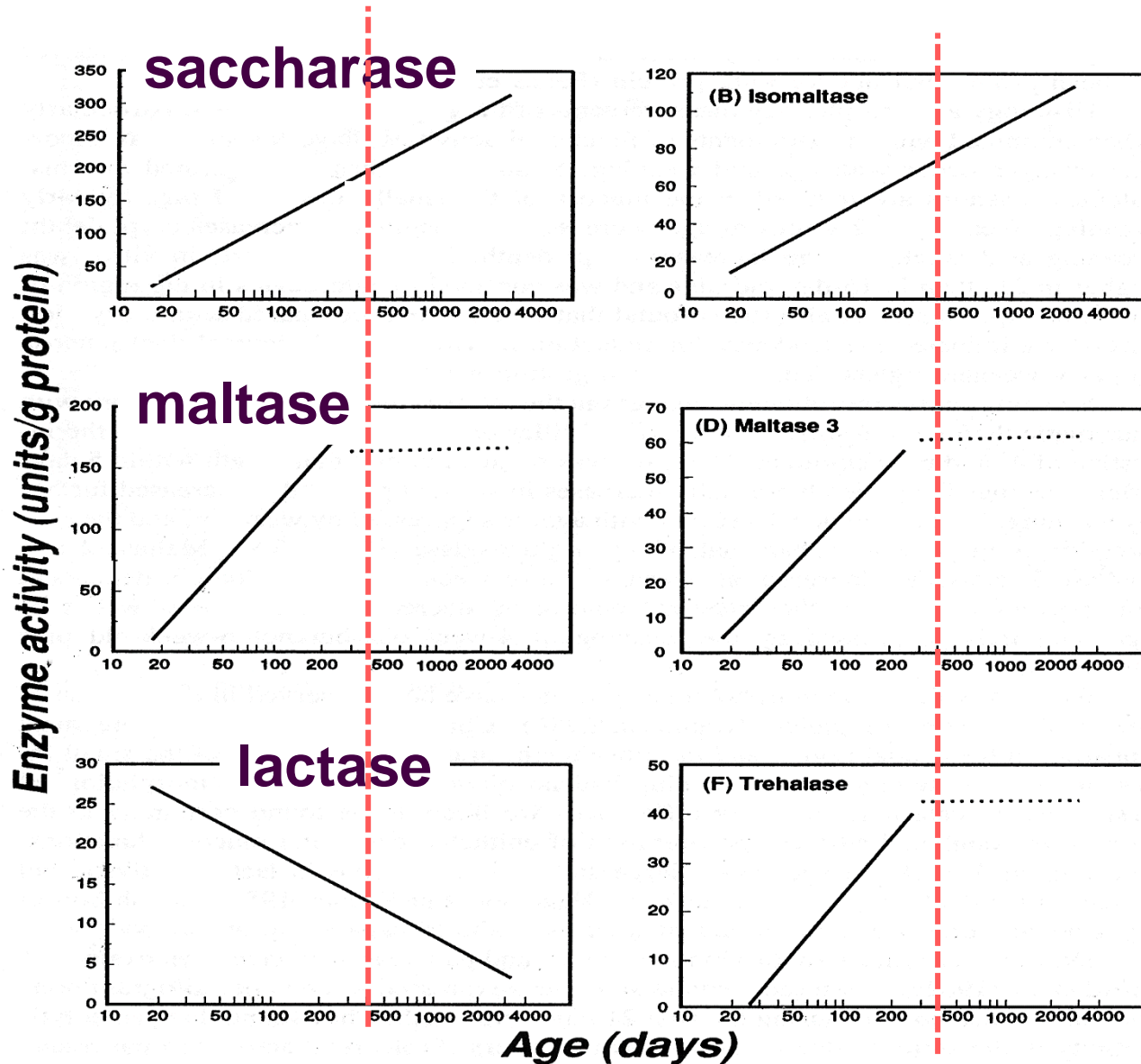
amylase pancréatique Maltose, maltotriose, dextrines à partir
amidon

Lactose, saccharose **non hydrolysés**

□ 2. au niveau de la bordure en brosse : oligosaccharidases produites par les entérocytes

➡ Glucose, fructose, galactose

Disaccharidases en fonction de l'âge



Digestion des glucides

■ Digestion intestinale

- 1. dans la lumière : amylase pancréatique
- 2. au niveau de la bordure en brosse : oligosaccharidases produites par les entérocytes
- 3. **au niveau du gros intestin** : digestion microbienne (surtout pour les herbivores monogastriques)

Digestion des glucides

■ Digestion microbienne

□ Enzymes microbiennes capables d'hydrolyser

■ Liaisons glucidiques α

■ **Liaisons glucidiques β** (cellulose, hémicellulose,...)

□ Production **d'acides gras à courtes chaînes**

(= acides gras volatils (AGV)) qui sont absorbés au niveau du gros intestin)

Source d'énergie importante pour les monogastriques herbivores

Digestion des glucides

■ Absorption

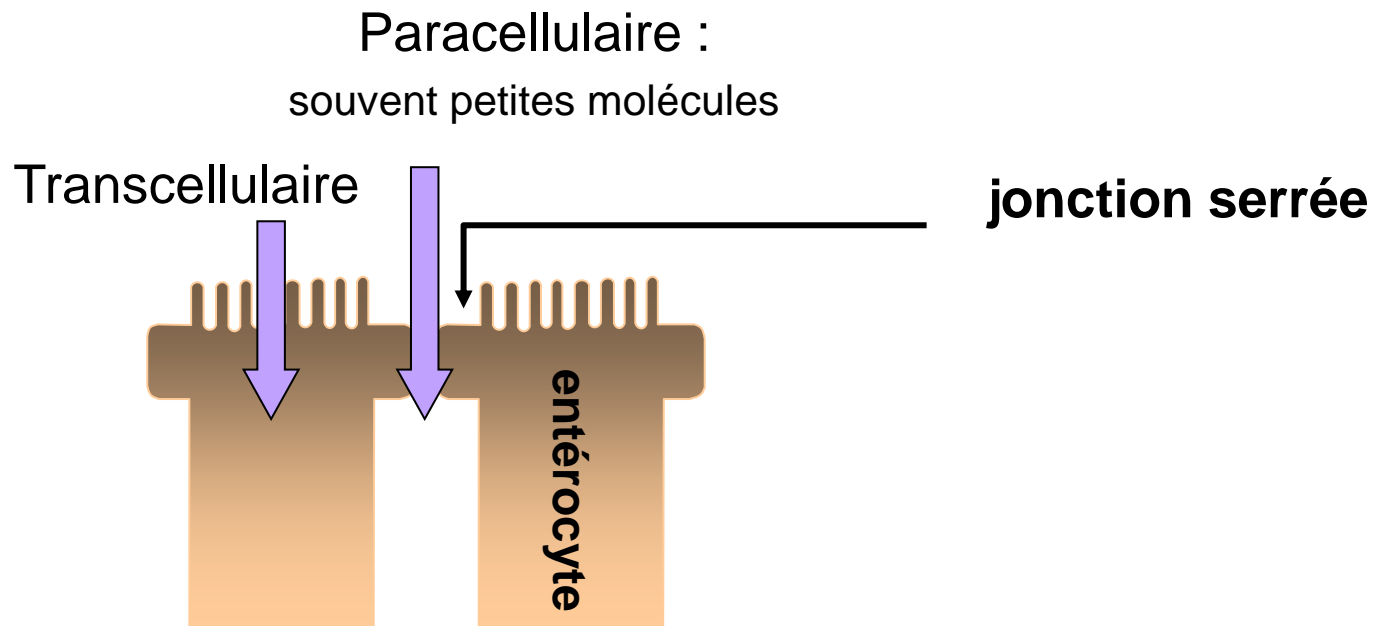
- **Seuls les monosaccharides** (glucose, fructose, galactose) **peuvent être absorbés** par les entérocytes



Les nouveau-nés (premières 24 heures) peuvent absorber des oligosaccharides par endocytose

- Absorption essentiellement dans **le duodénum et le jéjunum**

■ Rappel

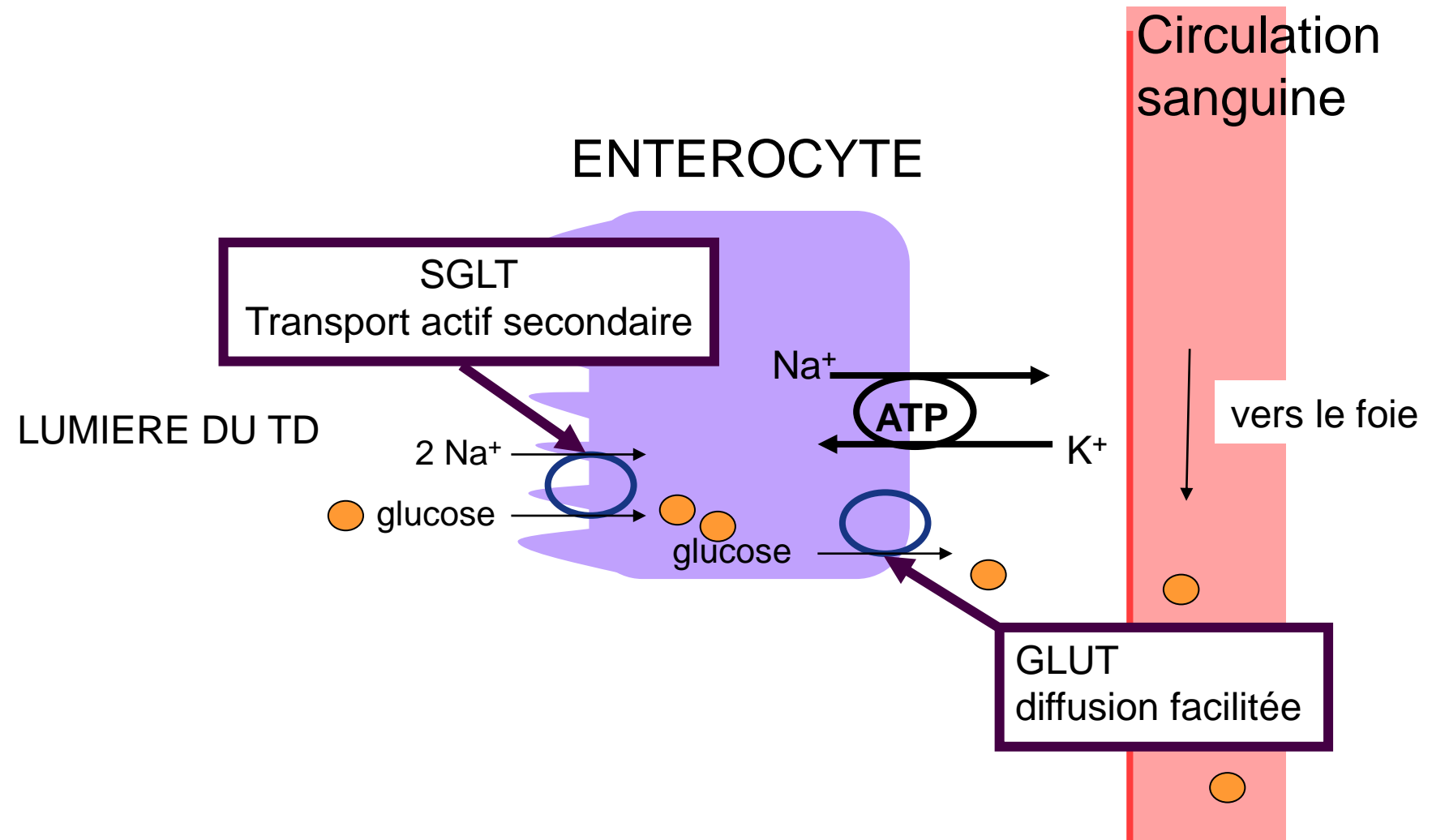


La membrane cellulaire est lipophile donc les sucres ne peuvent pas passer et ont besoin de **transporteurs**

Absorption des oses

- **Absorption des glucides par voie transcellulaire**
 - Deux familles de transporteurs
 - **Diffusion facilitée** qui ne nécessite pas d'ATP
Ex: GLUT (glucose transporter)
 - **Absorption active secondaire** qui nécessite de l'ATP
Ex: SGLT (sodium-glucose linked transporter)

Absorption des oses

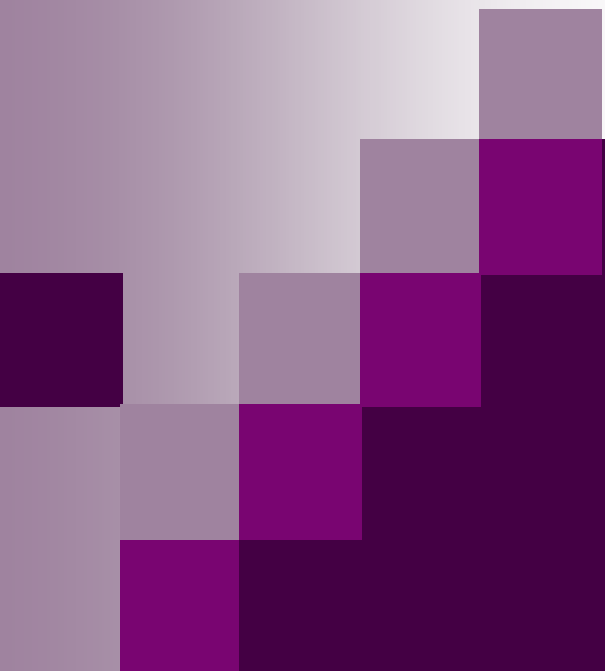


Absorption des oses

■ Transporteurs

- Au niveau de la **membrane apicale**
 - SGLT1 : glucose, galactose
 - GLUT5 : fructose

- Au niveau de la **membrane basolatérale**
 - GLUT2 : glucose, fructose et galactose



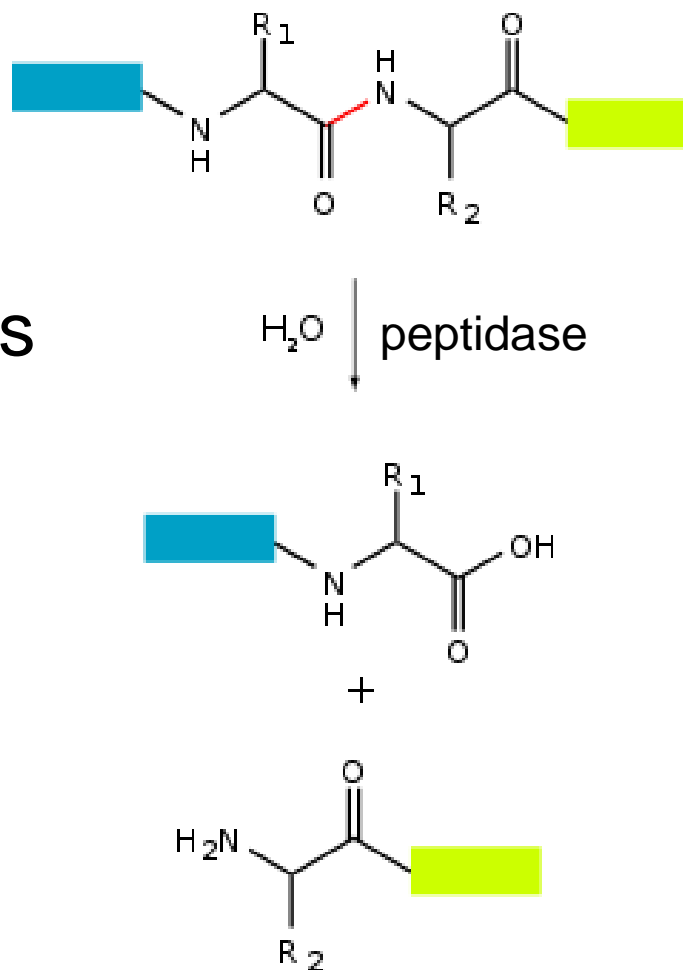
Digestion et absorption des protéines

Digestion des protéines

- Digestion principalement au niveau de **l'intestin grêle proximal**
- Absorption **d'acides aminés** mais aussi de **di- ou tri-peptides** dans les entérocytes

Digestion des protéines

- **Digestion** des protéines par des **peptidases** qui clivent les liaisons peptidiques



Digestion des protéines

■ Peptidases

- **Endopeptidases** peuvent couper à l'intérieur de la protéine
 - Pepsine (estomac)
 - Trypsine/élastase/chymotrypsine (pancréas)

Remarque : Le site de fixation et donc le site de coupure des enzymes dépend des **acides aminés présents** et de la structure de la protéine

Digestion des protéines

■ Peptidases

□ Endopeptidases

□ **Exopeptidases** libèrent les acides aminés situés aux extrémités de la protéine

- Carboxypeptidases coupent le dernier
- Aminopeptidases coupent le premier

□ Ces enzymes sont rapidement autodigérées dans l'intestin

Digestion des protéines

■ Digestion **pré-intestinale**

□ **Pepsine** dans estomac

- Sécrétée sous forme inactive (pepsinogène)
- Activée par le pH acide de l'estomac
- Casse des **liaisons avec des aa aromatiques**

- Importante dans la **dégradation du collagène**
- Assure **10-20 % de la digestion des protéines**

Digestion des protéines

■ Digestion intestinale

□ 1. **dans la lumière** de l'intestin (duodénum et jejunum)

■ Enzymes pancréatiques

□ Trypsinogène **activé** en **trypsine** grâce à une **entérokinase** produite au niveau de la bordure en brosse

□ Trypsine active ensuite les autres enzymes (**chymotrypsine, élastase, carboxypeptidase**)

Digestion des protéines

■ Digestion intestinale

- 1. dans la lumière de l'intestin au niveau du duodénum et jejunum
 - Enzymes pancréatiques

- 2. au niveau de **la bordure en brosse**

- Aminopeptidases, dipeptidases

➔ **Oligopeptides**

= les oligopeptides **peuvent être absorbés** s'ils sont composés de **moins de 3 aa**

67% des aa sont absorbés sous la forme d'oligopeptides (2 ou 3 aa liés par des liaisons peptidiques) / 33% sous la forme d'un seul aa

Digestion des protéines

■ Digestion intestinale

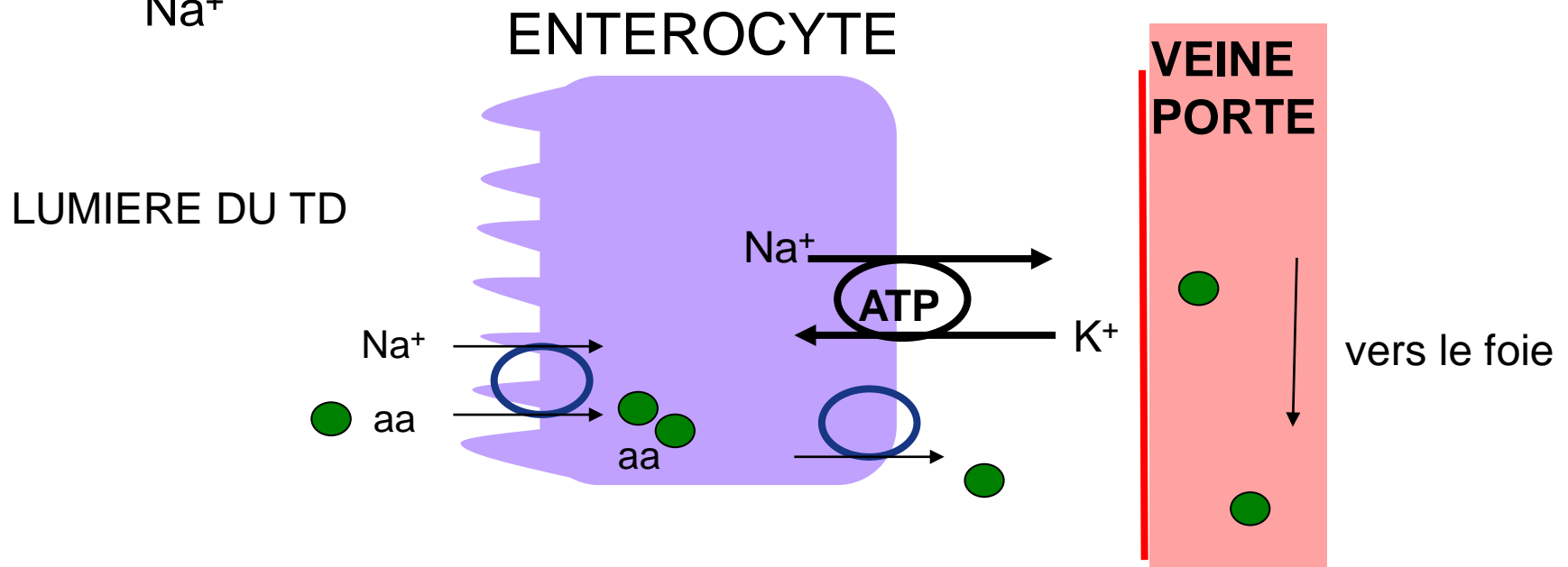
- 1. dans la lumière de l'intestin au niveau du duodénum et jejunum
 - Enzymes pancréatiques (trypsine, chymotrypsine, elastase, carboxypeptidase)

- 2. au niveau de la bordure en brosse
 - Aminopeptidases, dipeptidases

- 3. dans **les entérocytes**
 - Les liaisons des oligopeptides sont hydrolysées par des **peptidases intracellulaires**
= acides aminés libres (= 1 aa)

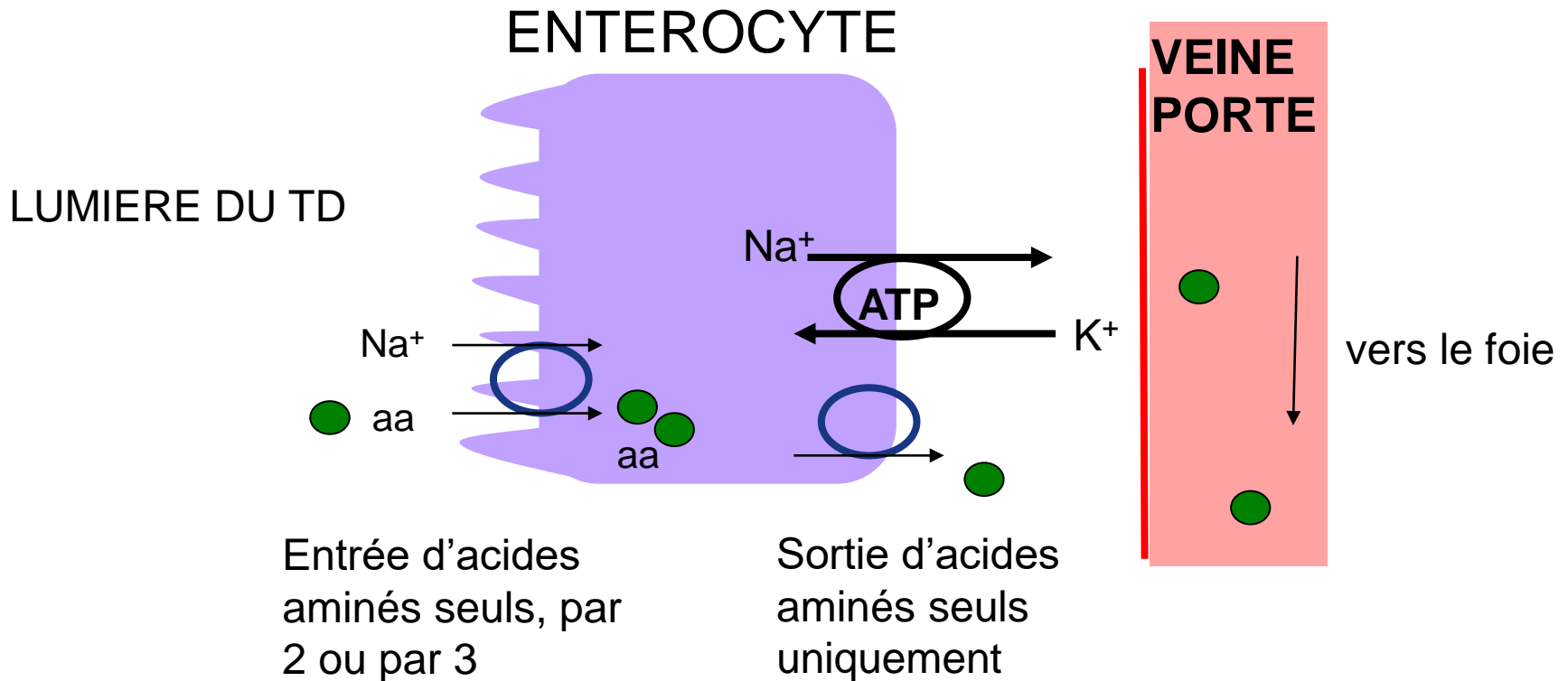
Absorption des acides aminés

- Absorption des acides aminés
 - **Transporteurs** au niveau des membranes apicales et basolatérales sont **spécifiques pour certains aa** (aromatique, aliphatique, basiques,...)
 - Transporteurs peuvent être **dépendants ou non** du gradient de Na^+



Absorption des acides aminés

- Absorption des acides aminés



Résumé

■ Digestion intestinale

1. **Digestion extracellulaire** dans la lumière du TD par des **enzymes pancréatiques**

➡ Permet une réduction de taille des grandes molécules (protéines, amidon,...) mais pas assez pour permettre une absorption.

2. **Digestion membranaire** au contact de la bordure en brosse par des **enzymes synthétisées par les entérocytes**

➡ Permet de libérer des molécules qui peuvent être absorbées

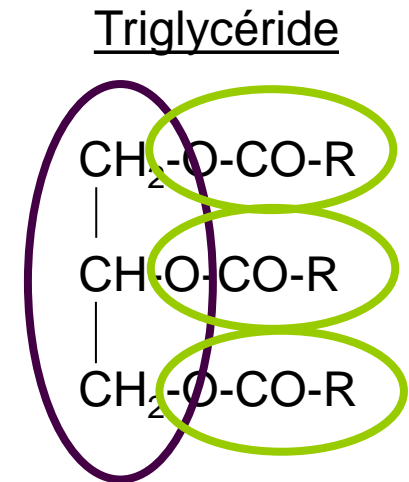
3. **Digestion intracellulaire** dans les entérocytes **seulement pour les peptides** et qui libère des acides aminés



Digestion et absorption des lipides

Digestion des lipides

- Les triglycérides, les phospholipides, les esters de cholestérol,... ne sont **pas absorbables**



glycérol acide gras

- Les substances absorbables sont:

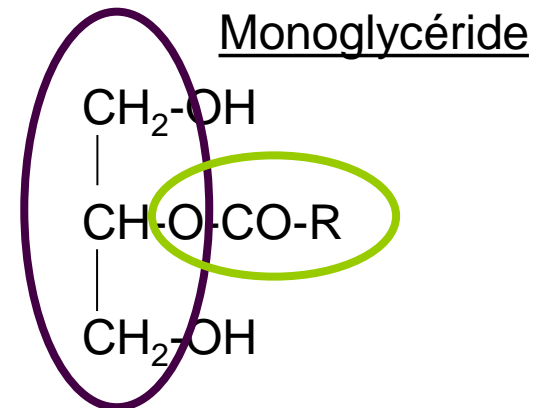
- Les acides gras libres



- Les monoglycerides

- Le cholestérol

- Les vitamines liposolubles



Digestion des lipides

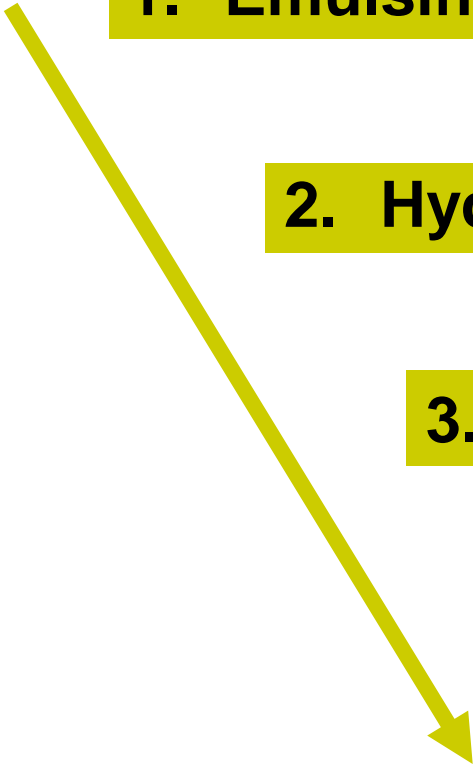
Grandes étapes de la digestion des lipides

1. Emulsification

2. Hydrolyse enzymatique des lipides

3. Formation de micelles

4. Absorption du contenu micellaire



Digestion des lipides

- La digestion et l'absorption impliquent :
 - des **enzymes**
 - Lipase (+ Colipase)
 - Cholestérol estérase
 - Phospholipase A₂
 - des **acides biliaires** et leurs sels qui **aident à**
 - l'activité enzymatique
 - l'absorption des produits de la lipolyse

Digestion des lipides

■ Digestion pré-intestinale

□ Digestion dans l'estomac

- Lipase linguale
- Lipase gastrique (chez le nouveau-né)

=10-30% de la digestion des graisses se fait dans l'estomac
chez l'Homme

Hydrolyse des TG à chaînes courtes

Digestion des lipides

Digestion intestinale

- Emulsification = **dispersion des lipides**
 - **Mélange hétérogène** de deux substances liquides **non miscibles** comme l'eau et l'huile.
 - **Dispersion** de l'une des substances (ici, **les lipides**) dans l'autre (ici, **la phase aqueuse**) sous forme de petites gouttelettes.
 - Le mélange reste stable grâce à un troisième composant appelé **émulsifiant** qui joue un rôle de tensioactif (ici, **les sels biliaires**).

Digestion des lipides

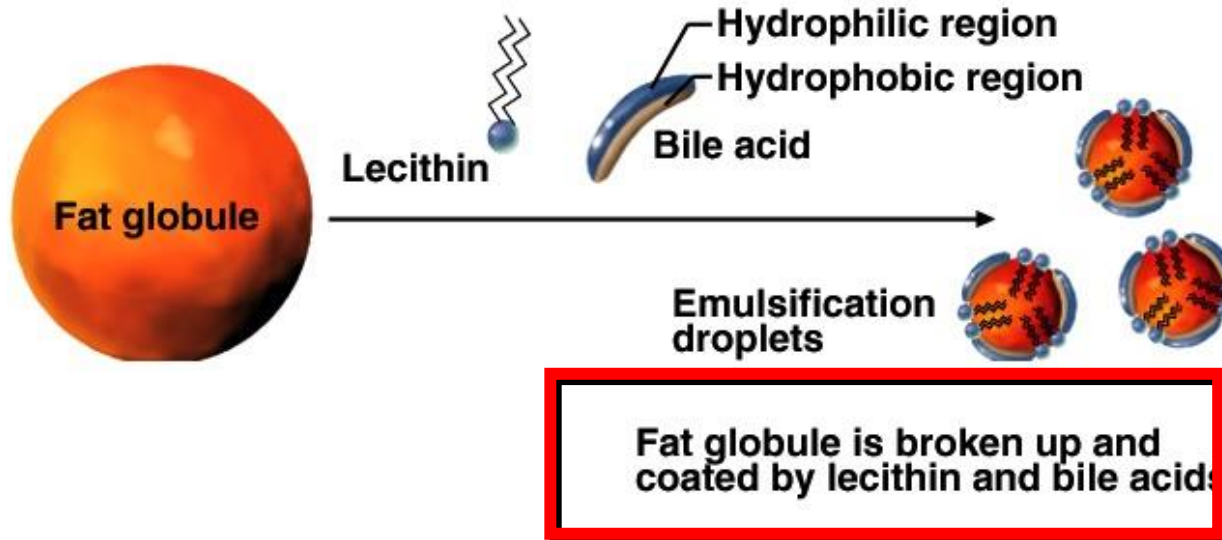
■ Emulsification

- **Sels biliaires** (cf cours physiologie de la sécrétion biliaire)
amphiphiles avec
 - un domaine **hydrophile** (acide aminé conjugué) et
 - un domaine **lipophile** (cholestérol)

- **Phospholipides**

Digestion des lipides

Emulsification des lipides dans l'intestin

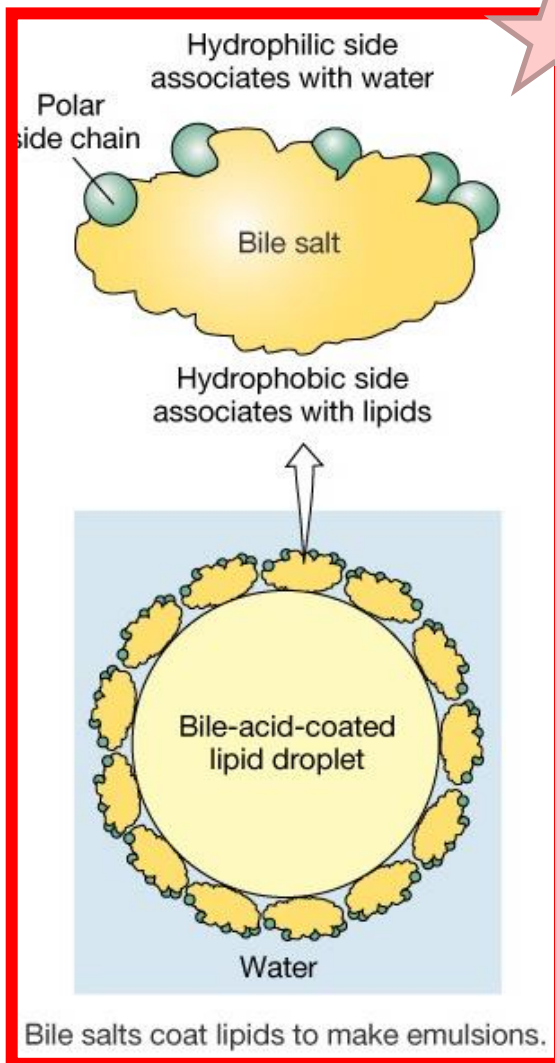


Les lipides sont émulsionnés dans l'intestin par les sels biliaires

Remarque : certains lipides alimentaires sont naturellement émulsionnés (lait)

Digestion des lipides

Emulsification des lipides dans l'intestin



- L'émulsion va rendre les lipides accessibles aux différentes **enzymes pancréatiques**

Digestion des lipides

- Enzymes impliquées dans la digestion

Enzymes	Origines	Sites d'action
Lipase acide	Glandes linguales Muqueuse gastrique	Estomac
Lipase (colipase)	Pancréas	Intestin grêle
Cholestérol estérase	Pancréas	Intestin grêle
Phospholipase A ₂	Pancréas	Intestin grêle

Digestion des lipides

Digestion enzymatique

□ Lipase

- Directement sécrétée sous forme active
- Active à pH=7-8
- Ne **peut pas rester accrochée** sur son substrat sans la **colipase** à cause de l'action détergente des sels biliaires

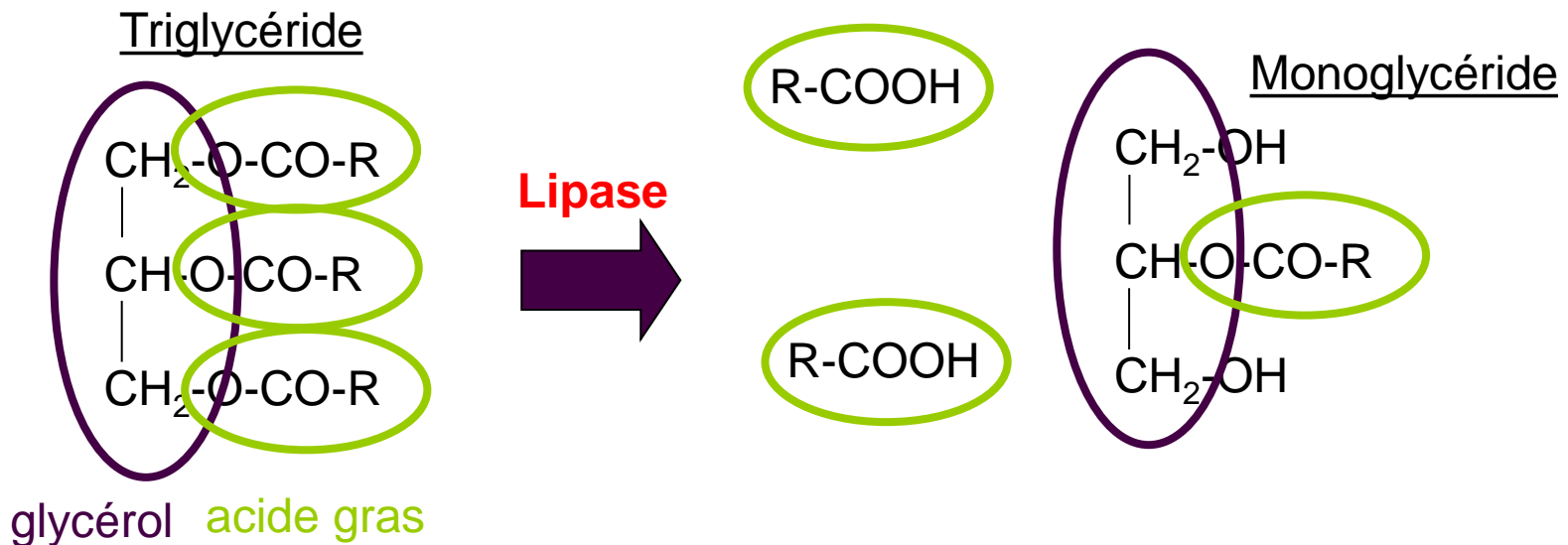
□ Colipase

- Sécrétée aussi par le pancréas mais sous forme inactive
- Activée par trypsine
- Se lie aux gouttelettes lipidiques
- La **lipase s'accroche ensuite à la colipase** et peut exercer son activité

Digestion des lipides

Digestion enzymatique

- Lipase (suite) hydrolyse les lipides très rapidement
 - Triglycérides (TG) hydrolysés en acides gras (AG) libres et en monoglycérides.
 - Hydrolyse **préférentielle sur les positions 1 et 3**



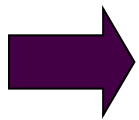
Digestion des lipides

Digestion enzymatique

- Cholestérol estérase :

- Hydrolyse les **esters de cholestérol, de vitamines A, D et E**
- Hydrolyse les 3 liaisons **esters des triglycérides**

= malgré le nom, c'est une **Estérase non spécifique**



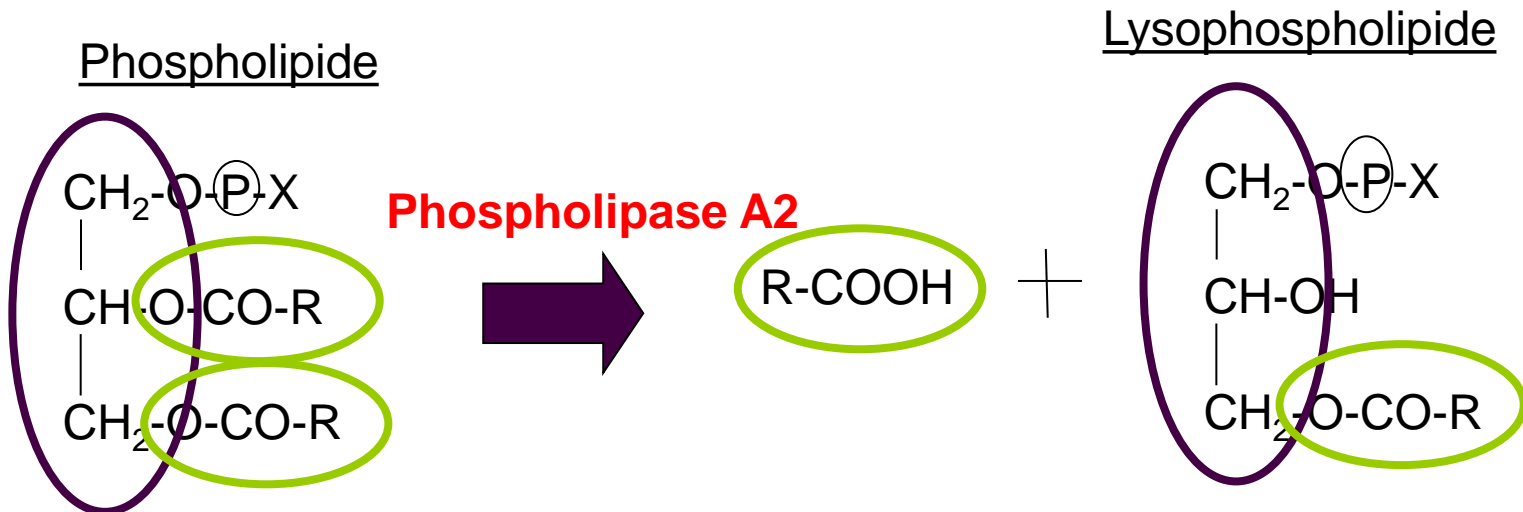
Libération d'acides gras libres, de cholestérol, vitamines et glycérol **non estérifiés**

Digestion des lipides

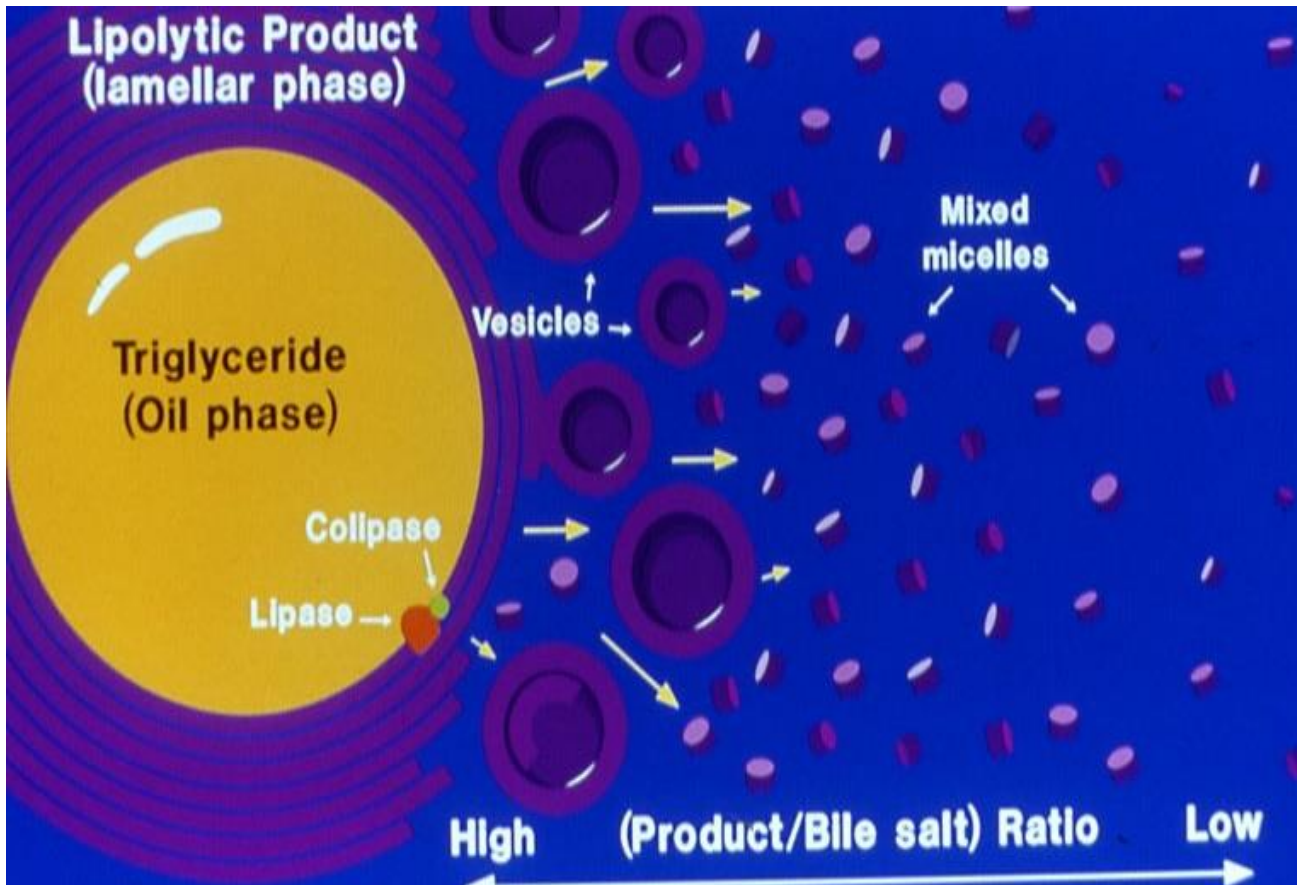
Digestion enzymatique

■ Phospholipase A2

- Sécrétée sous forme inactive (prophospholipase) et **activée par la trypsine**
- Hydrolyse les phospholipides pour en libérer les AG et le lysophospholipide



Digestion des lipides



Digestion des lipides

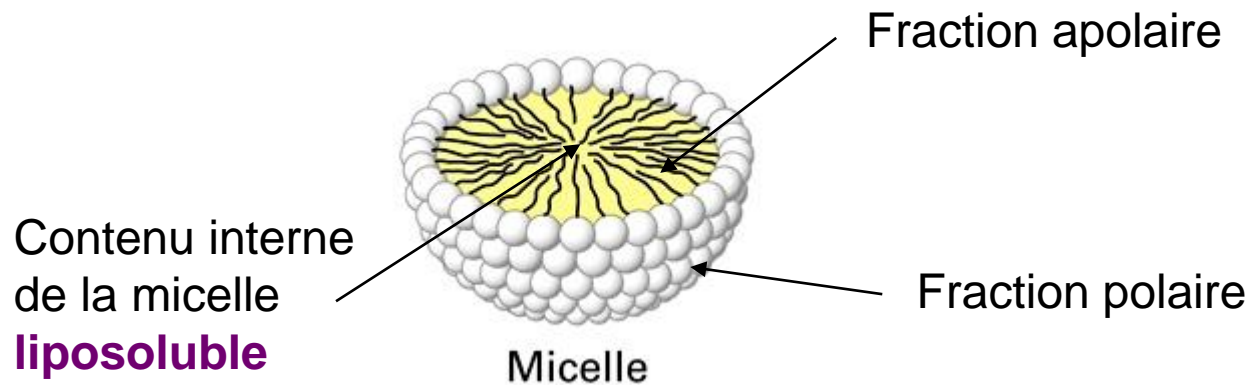
- Formation de micelles = **solubilisation des lipides**

□ Micelles

- = **complexes hydrosolubles** (de 4 à 6 nm) formés d'acides gras et de monoglycérides enrobés **de sels biliaires**
- beaucoup **plus petites** que les gouttelettes obtenues après émulsification
- **solubles** alors que les gouttelettes sont en suspension
- permettent la **diffusion** de substances lipophiles vers la bordure en brosse **à travers un contenu intestinal aqueux**

Digestion des lipides

- Formation de micelles = solubilisation des lipides
 - Fraction polaire vers l'extérieur
 - Fraction apolaire (lipides) à l'intérieur



Contenu intestinal **hydrosoluble**

Absorption des lipides

■ Micelles

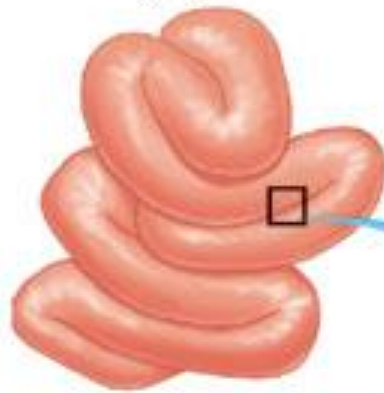
- Apportent les acides gras et les monoglycérides jusqu'à la bordure en brosse des entérocytes par **diffusion dans le milieu aqueux**

Remarque : les acides gras à courtes chaînes sont assez solubles dans l'eau et n'ont pas besoin de micelles pour diffuser

- Puis **AG et monoglycérides** quittent les micelles et entrent dans les entérocytes par **diffusion (ou transporteurs) à travers la membrane lipidique.**

Absorption des lipides

- Au niveau de la bordure en brosse, les **sels biliaires** sont libérés dans la lumière intestinale
 - Participent à la formation de nouvelles micelles ou
 - Sont absorbés dans l'iléon pour subir un **recyclage entéro-hépatique** (voir cours sur la sécrétion biliaire)



Intestinal epithelial cell

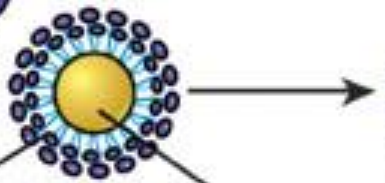
Capillary

Lacteal



Micelles contact epithelial plasma membrane

1

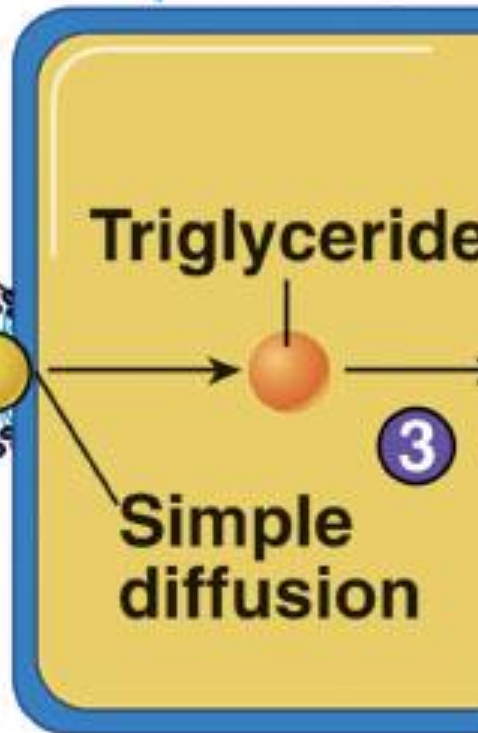


Bile salt

Fatty acids and glycerol

Micelle

2



Triglyceride

3

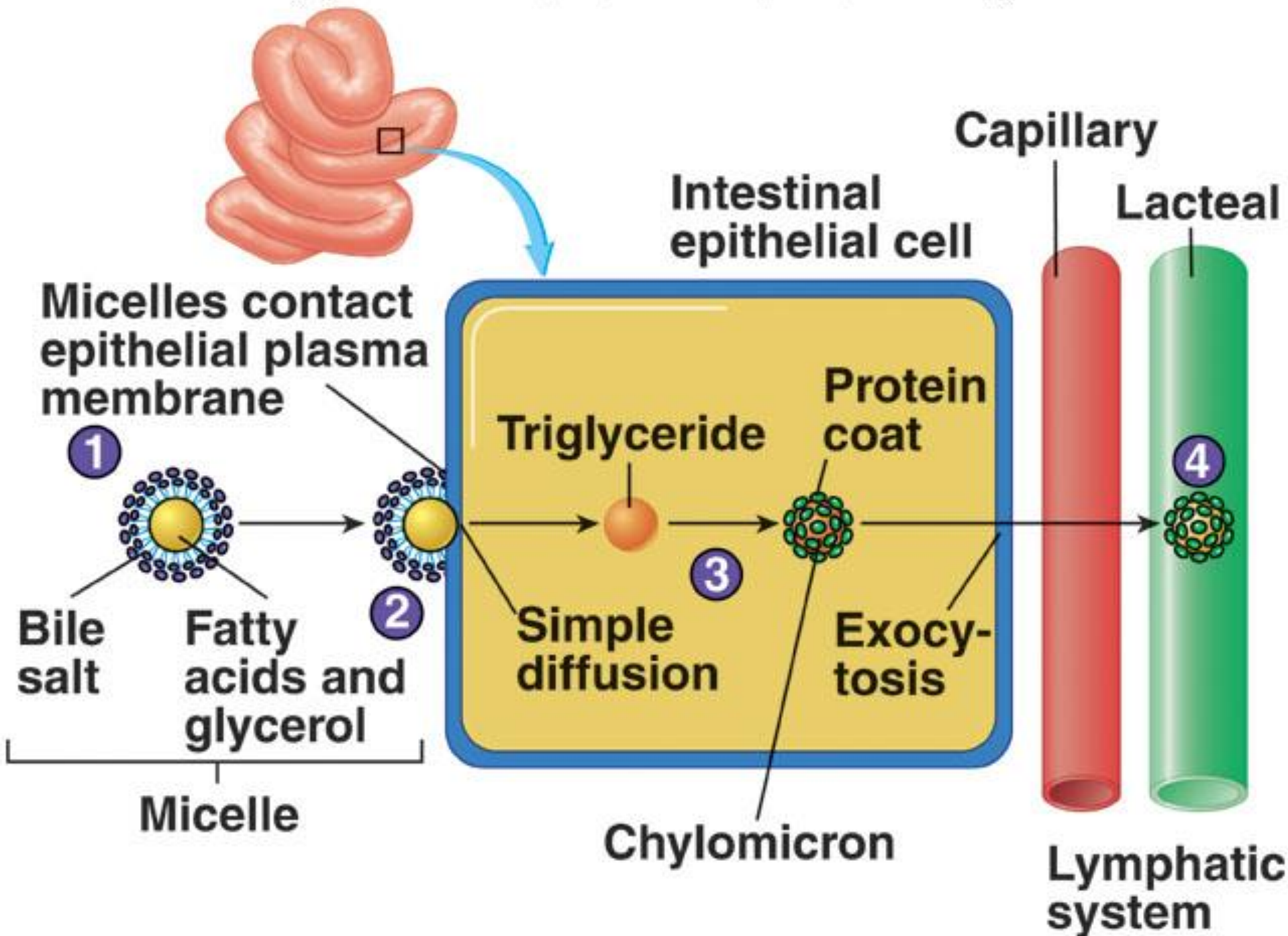
Simple diffusion

Absorption des lipides

■ Devenir des lipides absorbés

□ Acides gras:

- **À courtes chaînes** = moins de 10-12 atomes de carbone
 - Plus hydrosolubles que les AG à longues chaînes
 - **Absorbés directement dans le sang portal**
- **A longues chaînes** = plus de 10-12 atomes de carbone
 - **Reestérifiés sous forme de triglycérides ou de phospholipides** dans les entérocytes avec du glycérol dans le réticulum endoplasmiques
 - Participent avec des protéines à la formation **des chylomicrons**
 - Entrent dans la **circulation lymphatique** 



Absorption des lipides

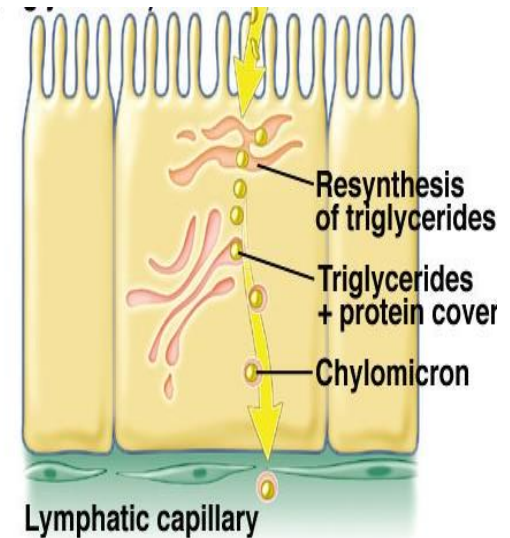
■ Devenir des lipides absorbés (suite)

□ Cholestérol

- Estérifié dans l'entérocyte puis intégré à des chylomicrons

□ Vitamines liposolubles A, D, E et K

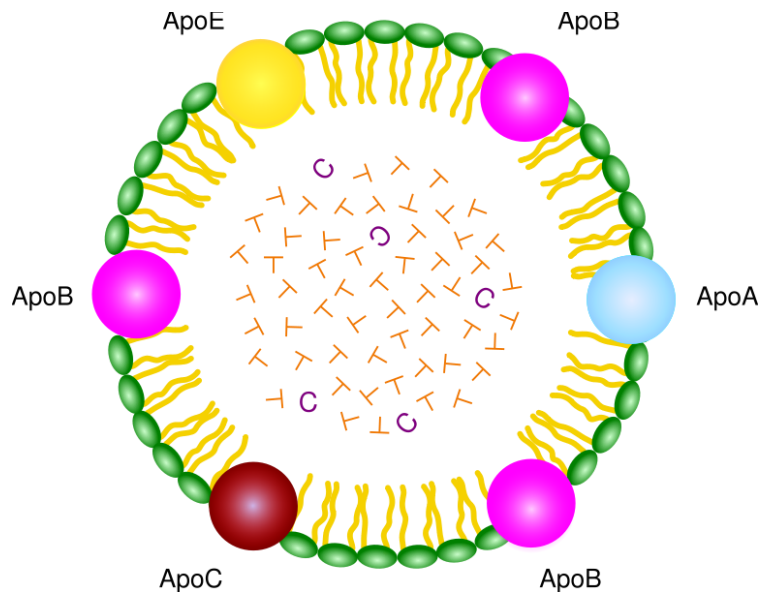
- Intégrées à des chylomicrons
- **Lipides alimentaires favorisent leur absorption**



Absorption des lipides

■ Chylomicrons

- 80-90% triglycérides, 8-9% phospholipides, 2% cholestérol, 2% protéines
- Le **cholestérol, les triglycérides et les vitamines liposolubles** sont **enrobés** d'**apolipoprotéines** et de **phospholipides**

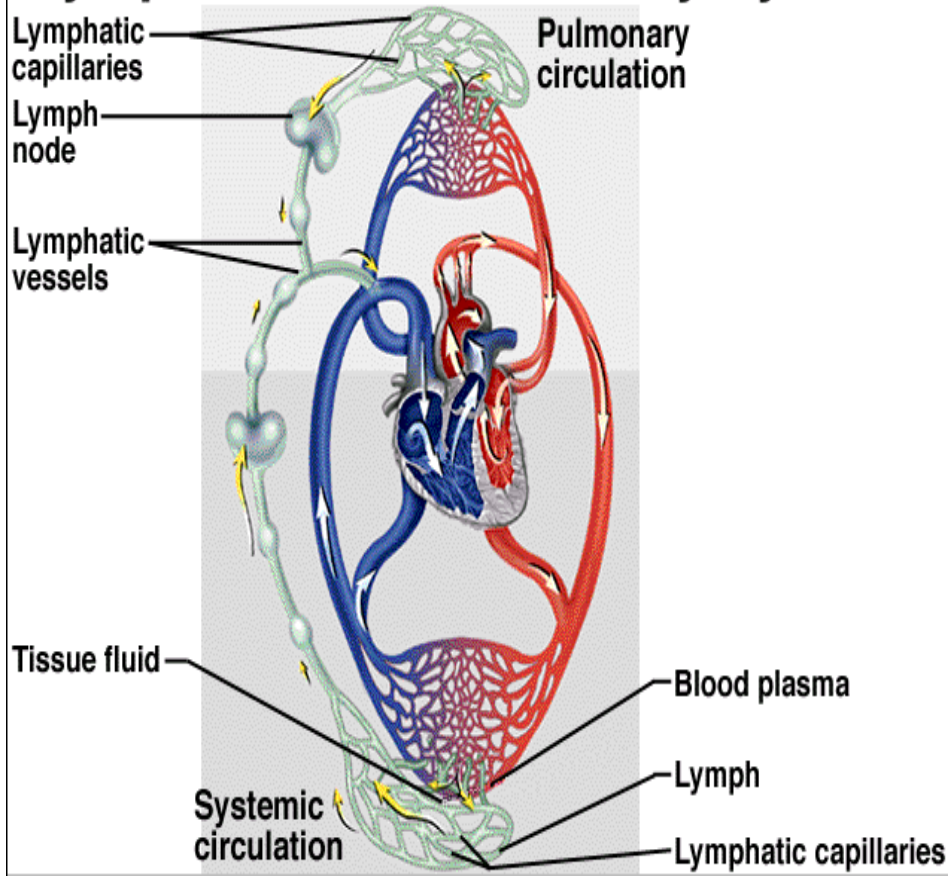


ApoA, ApoB, ApoC, ApoE = apolipoprotéines
T =triglycérides
C =cholestérol
Vert et jaune =phospholipides

Digestion des lipides

- Devenir des chylomicrons

Lymphatic and Circulatory Systems

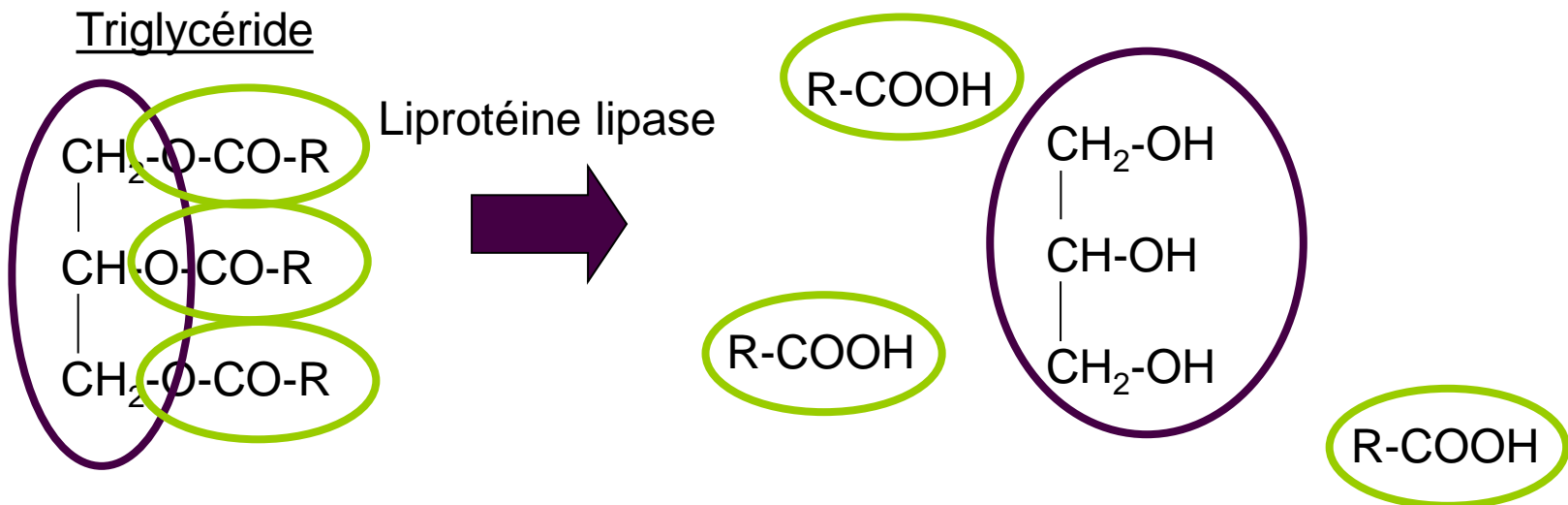


Les chylomicrons vont gagner, par la voie lymphatique, la **circulation sanguine** via la veine sous-clavière

Digestion des lipides

■ Devenir des chylomicrons

- Dans le tissu adipeux, le cœur, les muscles et la mamelle en période de lactation, la **lipoprotéine lipase** (localisée à la surface de l'endothélium des capillaires sanguins) **hydrolyse les triglycérides** des chylomicrons **en glycérol et acides gras libres**



Résumé

- **Emulsification** (formation de gouttelettes)
- **Hydrolyse** par différentes enzymes
- Formation de **micelles**
- **Absorption** par les entérocytes
- Formation **d'esters et enrobage dans des chylomicrons** dans les entérocytes
- Passage dans la **circulation lymphatique**
- Arrivée lente dans la **circulation sanguine**
- **(Utilisation par les cellules)**