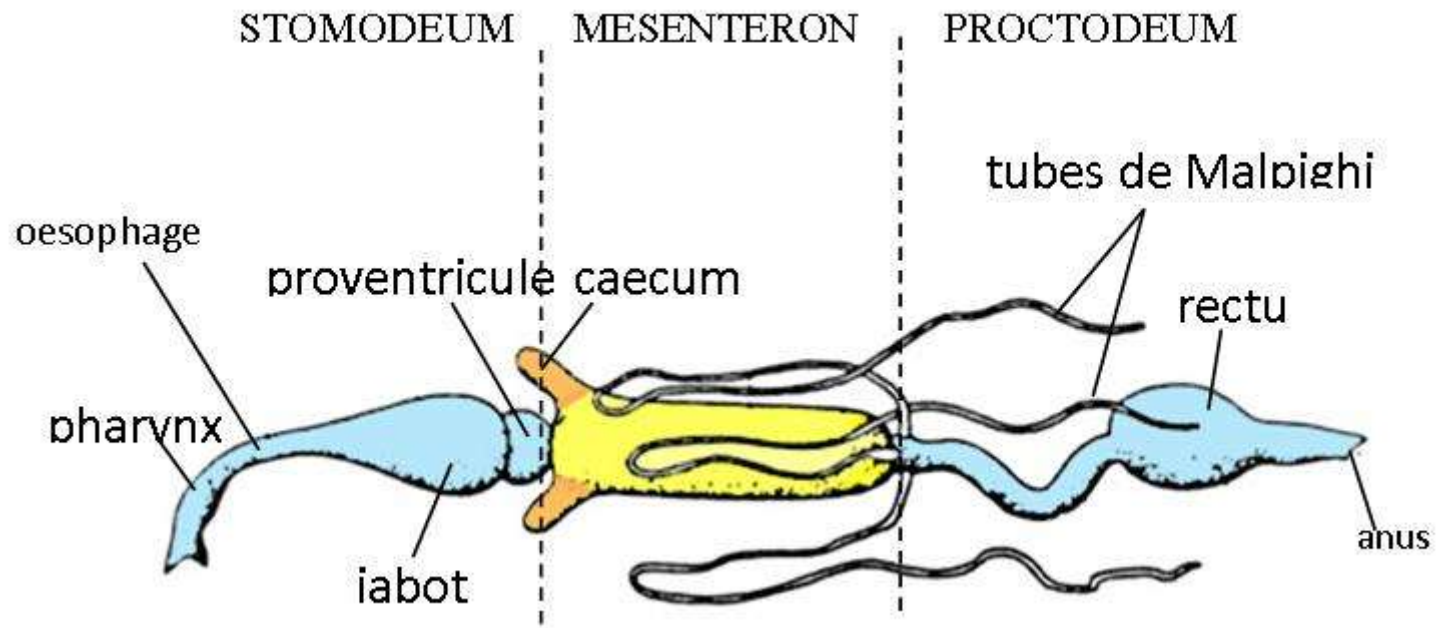


Le tube digestif des insectes

LA STRUCTURE DU TUBE DIGESTIF DES INSECTES

- Il se compose communément de trois grands ensembles (figure suivante)
 - à l'avant, le **stomodeum** ou intestin antérieur (foregut en anglais) ;
 - au centre, le **mésentéron** ou l'intestin moyen (midgut) ;
 - à l'arrière, le **proctodeum** ou l'intestin postérieur (hindgut)
- À la jonction du mésentéron et du proctodeum se trouvent les **tubes de Malpighi**

Tube digestif des insectes



- Le mésentéron dérive de l'endoderme embryonnaire, alors que le stomodeum et le proctodeum ont une origine ectodermique
- L'épithélium de ces trois ensembles est unistratifié
- Les cellules du stomodeum et du proctodeum, sécrètent une cuticule formant 1 continuité avec celle qui recouvre l'insecte
- Elle est appelée **intima**, et est renouvelée à chaque mue
- Quant au mésentéron, il est bordé chez la plupart des insectes d'une **matrice péritrophique** très fine entourant le bol alimentaire, et qui est sécrétée par la zone proventriculaire liant l'intestin antérieur à l'intestin moyen

- En général, le tube digestif est **continu** de la bouche à l'anus, mais chez certains insectes n'ingérant que des liquides (pucerons galligènes racinaires comme le **phylloxera**), la connexion entre le mésentéron et le proctodeum est **occluse**.
- C'est également le cas des larves de **Névroptères** qui digèrent leurs proies de façon **extra-orale**

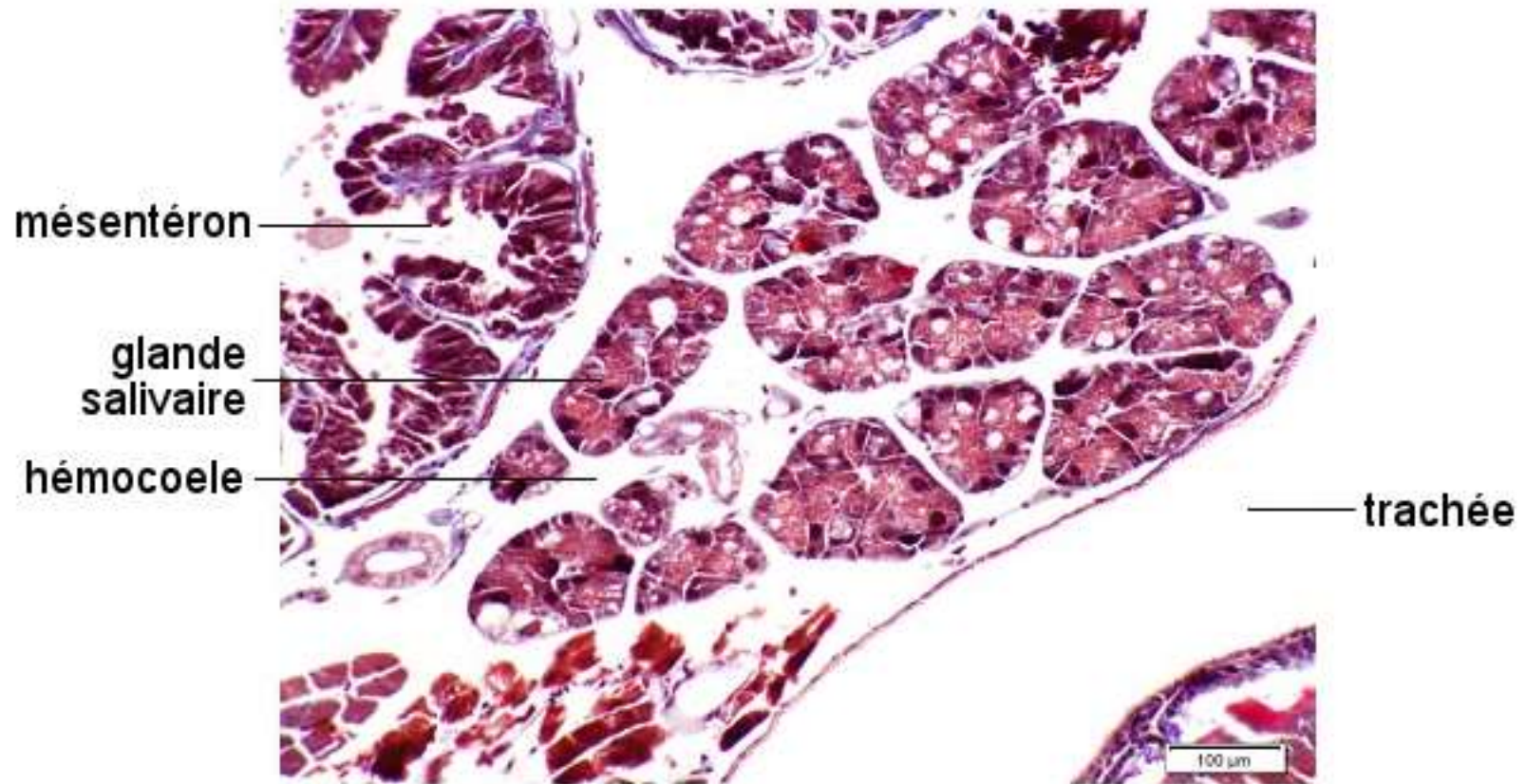
Devant le tube digestif : glandes et sécrétions salivaires

- La bouche des insectes n'est pas visible et s'ouvre dans la **cavité préorale** située entre **l'hypo- et l'épipharynx**
- Cette cavité, présente directement devant la bouche, constitue le **cibarium**, où la nourriture passe
- La cavité préorale contient également une autre chambre entre, **l'hypopharynx et le labium**: le **salivarium**, où la salive se déverse à partir d'une paire de **glandes labiales ou salivaires**

- Ces glandes jouent un rôle prépondérant dans l'ingestion, le mouvement de nourriture et la digestion
- Les amas de cellules glandulaires regroupées en grappe se situent dans le **thorax** de l'insecte, parfois jusqu'à l'**abdomen** chez certaines chenilles de papillon.
- En plus de leur fonction **salivaire**, ces glandes peuvent être modifiées pour synthétiser la **soie**, comme c'est le cas chez certains **Lépidoptères**, **Trichoptères** et **Hyménoptères**

- les glandes mandibulaires, situées dans la tête de nombreuses espèces d'insectes, jouent un rôle important dans la **lubrification** des mandibules et constituent les principales glandes salivaires des larves de Lépidoptères
- Chez de nombreux insectes parasites: punaises, pucerons et moustiques, des pièces buccales modifiées constituent un appareil **piqueur-suceur complexe** où le canal et les sécrétions salivaires jouent un rôle primordial dans l'interaction avec l'hôte

Glandes salivaires de Criquet en coupe transversale (Collection de l'ENS de Lyon) Copyright : 2017 Sandrine Heusser Mikail Ferrandi Oulony Mendy Axel Tyburn Marlène Vaury



Le stomodeum

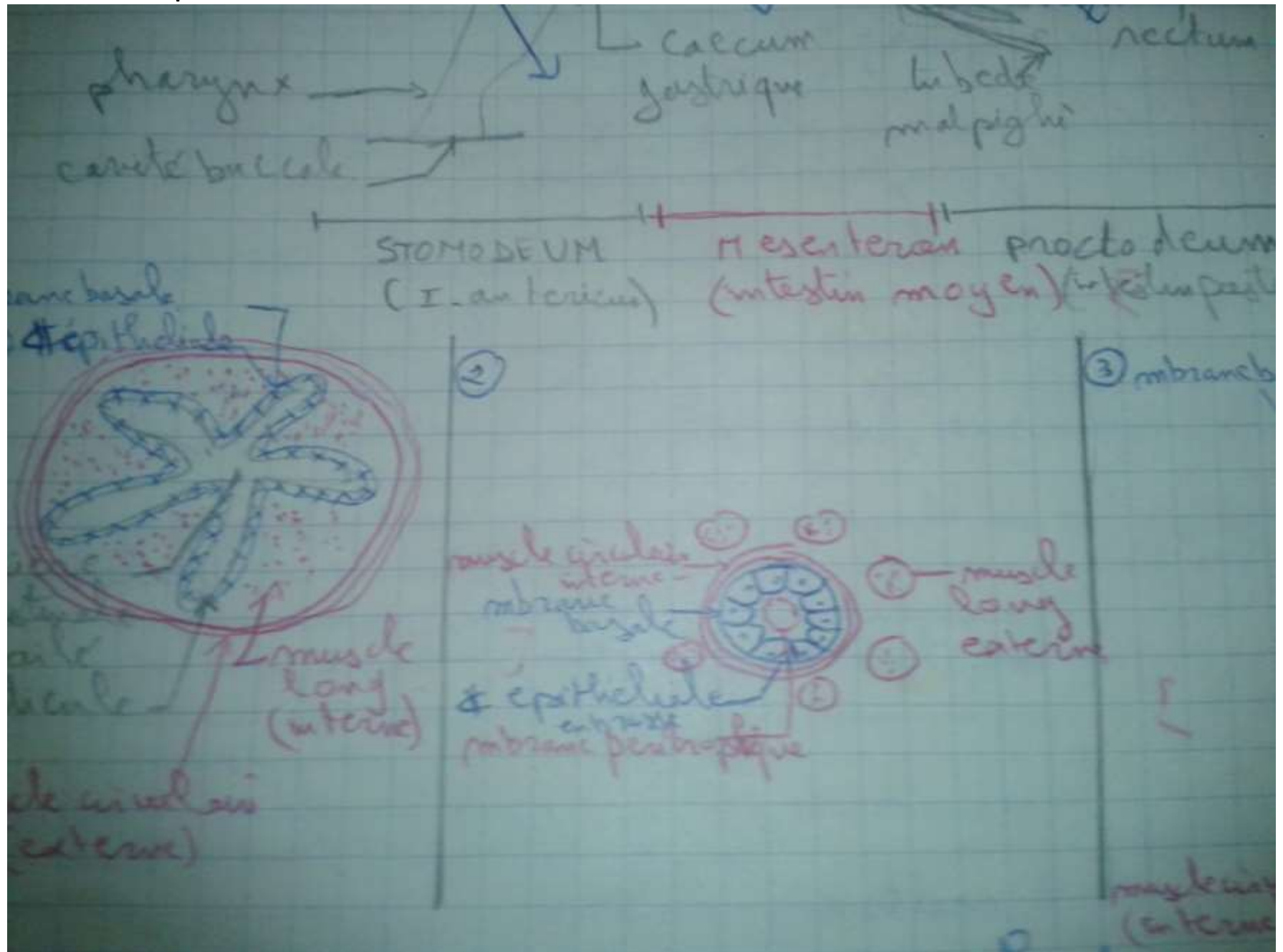
Il est constitué de:

- **Pharynx**: chez les pucerons, il sert de pompe aspirante de sève
- **Œsophage**: dont la partie postérieure se transforme parfois en réservoir alimentaire: le **jabot**, servant à stocker et mastiquer les aliments
- **proventricule** ou **gésier**: orné intérieurement par de petites dents ou spicules, agissant comme filtre et régulent le passage de nourriture et d'enzymes digestives du jabot au mésentéron

- Chez les insectes se nourrissant exclusivement de liquides, le proventricule est un simple sphincter
- chez les fourmis, permet la séparation de la partie partiellement digérée dans le mésentéron de celle du jabot, utilisée pour la **trophallaxie**.

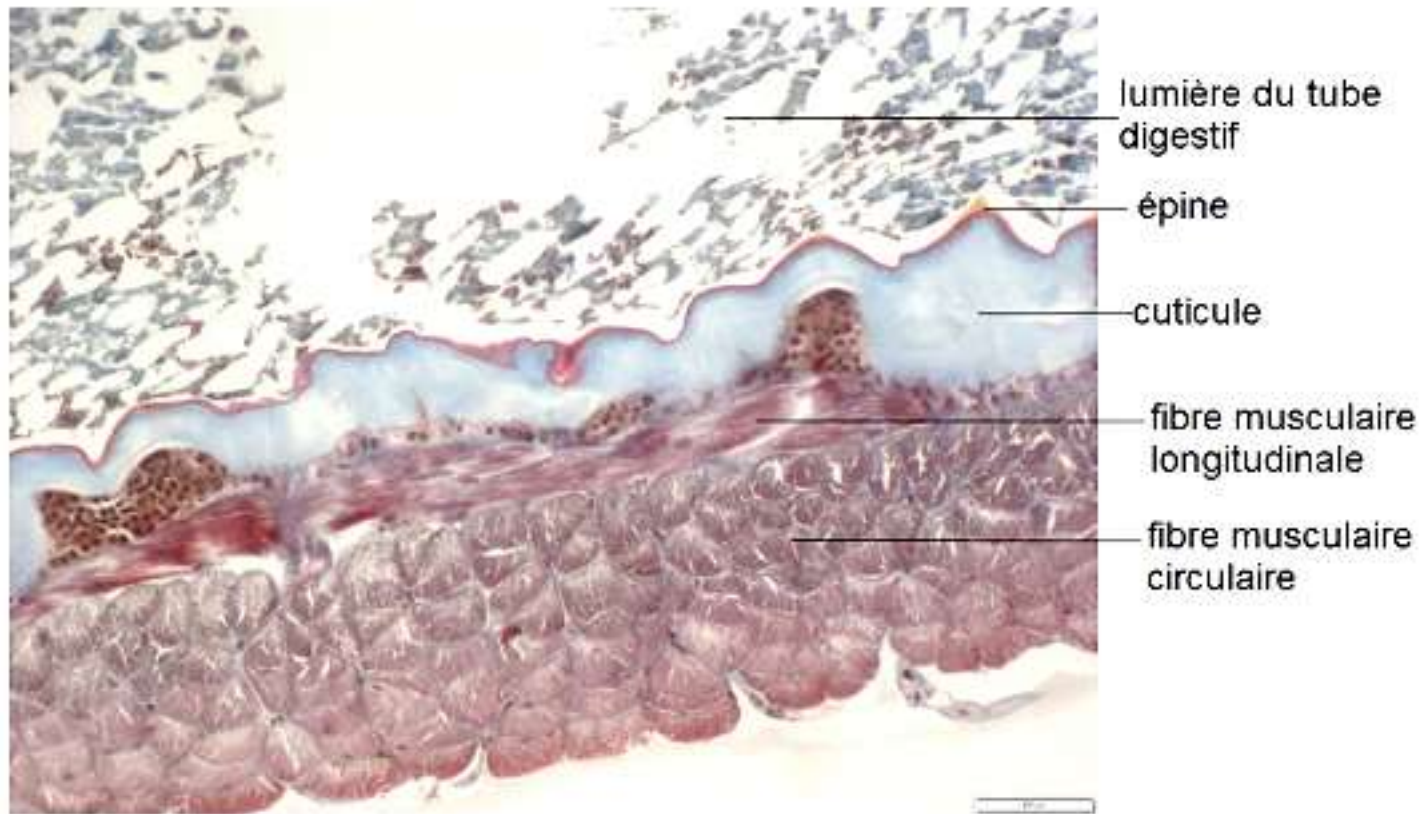
- Chez les abeilles, le proventricule retient le nectar dans le jabot et laisse passer les grains de pollen dans le mésentéron
- Chez beaucoup d'Orthoptères et certains Coléoptères, il permet le broyage des aliments.
- **valvule cardiaque**: invagination occlusive séparant le stomodeum du mésentéron

Coupe transversale au niveau du stomodeum et du mesenteron



Gésier de Criquet en coupe longitudinale (Collection de l'ENS de Lyon)

Copyright : 2017 Mikail Ferrandi Oulony Mendy Axel Tyburn Marlène Vaury

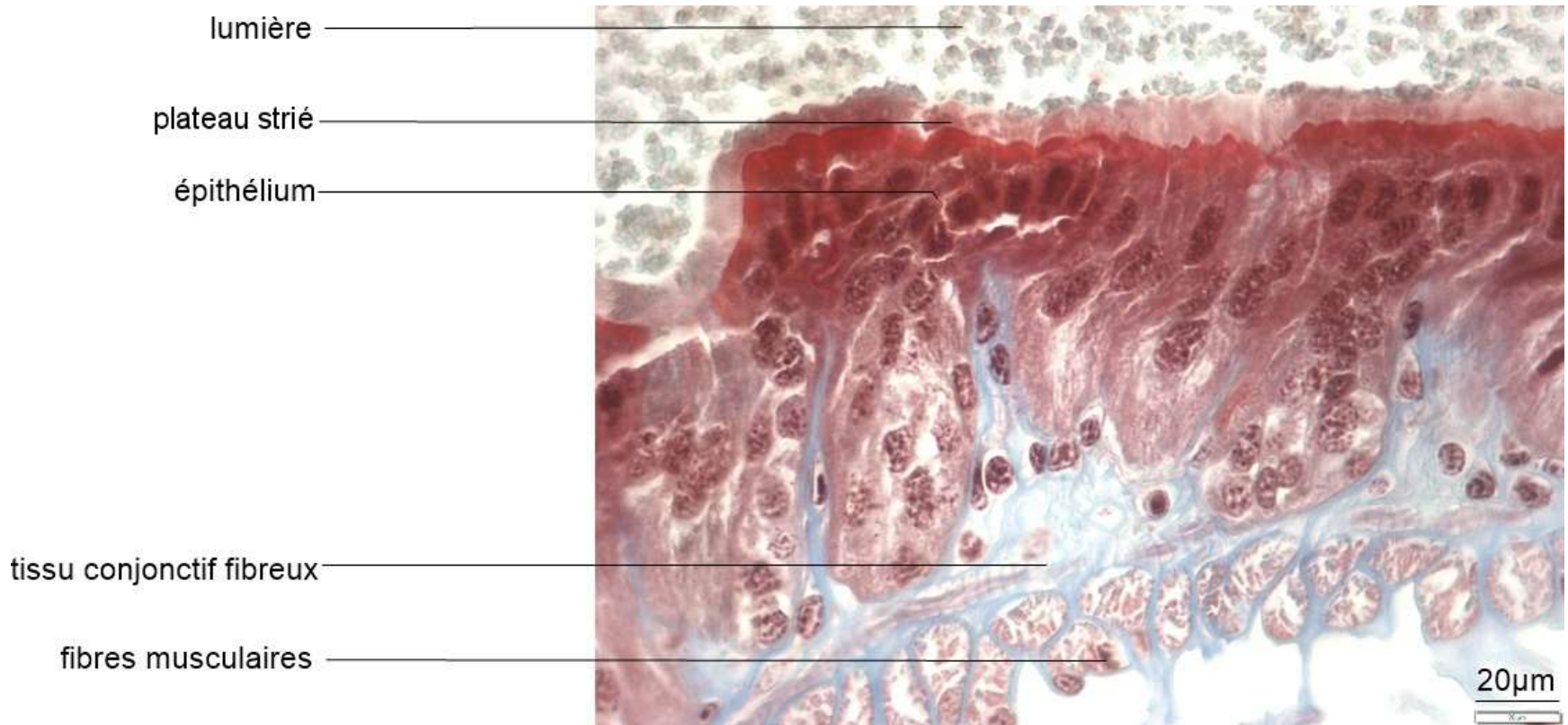


Le mésentéron

- Ce sont essentiellement des **cellules sécrétrices spéciales**, situées entre la région proventriculaire et la valvule cardiaque qui sont responsables de la formation de la **matrice péritrophique**
- Les cellules du mésentéron sont activement impliquées dans la production et la sécrétion d'**enzymes**, ainsi que dans l'absorption et la digestion de nutriments
- La membrane de ces cellules vers le **lumen** du tube digestif a un aspect de chevelure en brosse (**microvillosités**), permettant d'accroître considérablement la surface d'absorption entre les cellules et les nutriments circulant dans le lumen
- Ces microvillosités sont recouvertes d'une couche filamenteuse de glycoprotéines: **Glycocalix**
- Dans la plupart des cas, la synthèse d'enzymes s'effectue au moment de la sécrétion dans le lumen du tube digestif, évitant leur accumulation dans les cellules.

- **NB-** Les cellules épithéliales du mésentéron ont une durée de vie courte et doivent donc être fréquemment régénérées à partir des cellules souches au cours des processus de mue et de métamorphose, qui renouvellent chacun complètement le stock cellulaire des épithéliums intestinaux.

Mésentéron de Criquet en coupe longitudinale (Collection de l'ENS de Lyon) Copyright : 2017 Mikail Ferrandi Oulony Mendy Axel Tyburn Marlène Vaury



- Des **cellules endocrines**, impliquées dans la régulation de la production d'enzymes, sont également présentes dans l'épithélium du mésentéron.
- À la jonction du mésentéron et du proctodeum, il est facile de distinguer deux **tubes de Malpighi** servant de système « excréteur » aux insectes.
- Ces tubes sont étroitement associés à la partie terminale du mésentéron.
- À ce niveau, il existe une **valve pylorique**, particulièrement développée chez les chenilles de papillons et les Coléoptères.

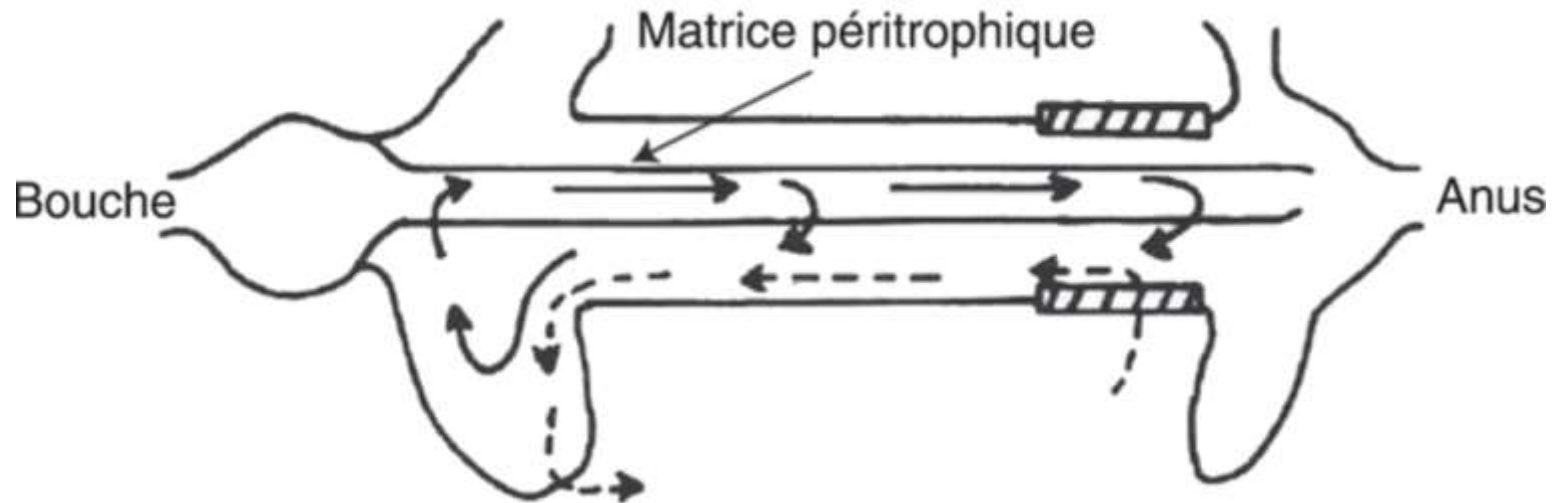
La matrice péritrophique

- Elle est présente chez la plupart des insectes, à l'exception des **Hémiptères**
- Chez les **Diptères**, cette matrice est absente pour les individus à jeun et ne se forme que pendant la prise de nourriture
- Cette matrice (fig.) est d'environ 1 μm d'épaisseur, et entoure la nourriture, l'isolant de l'épithélium du mésentéron

- constituée de **chitine, de glycoprotéines et de protéines**
- produite à partir des microvillosités des cellules épithéliales et prend place à deux endroits: à partir de:
 - cellules sécrétrices situées entre la partie invaginée de la valvule cardiaque et de la partie antérieure du mésentéron
 - cellules sécrétrices dispersées le long du mésentéron

- Cas des **Orthoptères** et les larves de **Lépidoptères** et d'**Hyménoptères**
- Chez les **moustiques**, elle est produite à partir de la valvule cardiaque pour les larves et par l'épithélium du mésentéron pour les adultes
- cette matrice suit le mouvement de la nourriture d'avant en arrière le long du tube digestif et est évacuée avec les excréments (fig.)

Flux d'eau dans le bol intestinal, l'espace endopéritrophique
et l'épithélium digestif des insectes holométaboles



- Cette matrice joue un rôle:
 - protecteur vis-à-vis des cellules épithéliales du mésentéron, contre l'abrasion de certains aliments
 - lubrifier la paroi du mésentéron, facilitant la circulation des aliments
 - filtre contrôlant le passage des enzymes sécrétées et inversement celui des produits de digestion dans les cellules épithéliales.
 - empêcher la contamination de la couche cellulaire par des micro-organismes pathogènes véhiculés par des aliments

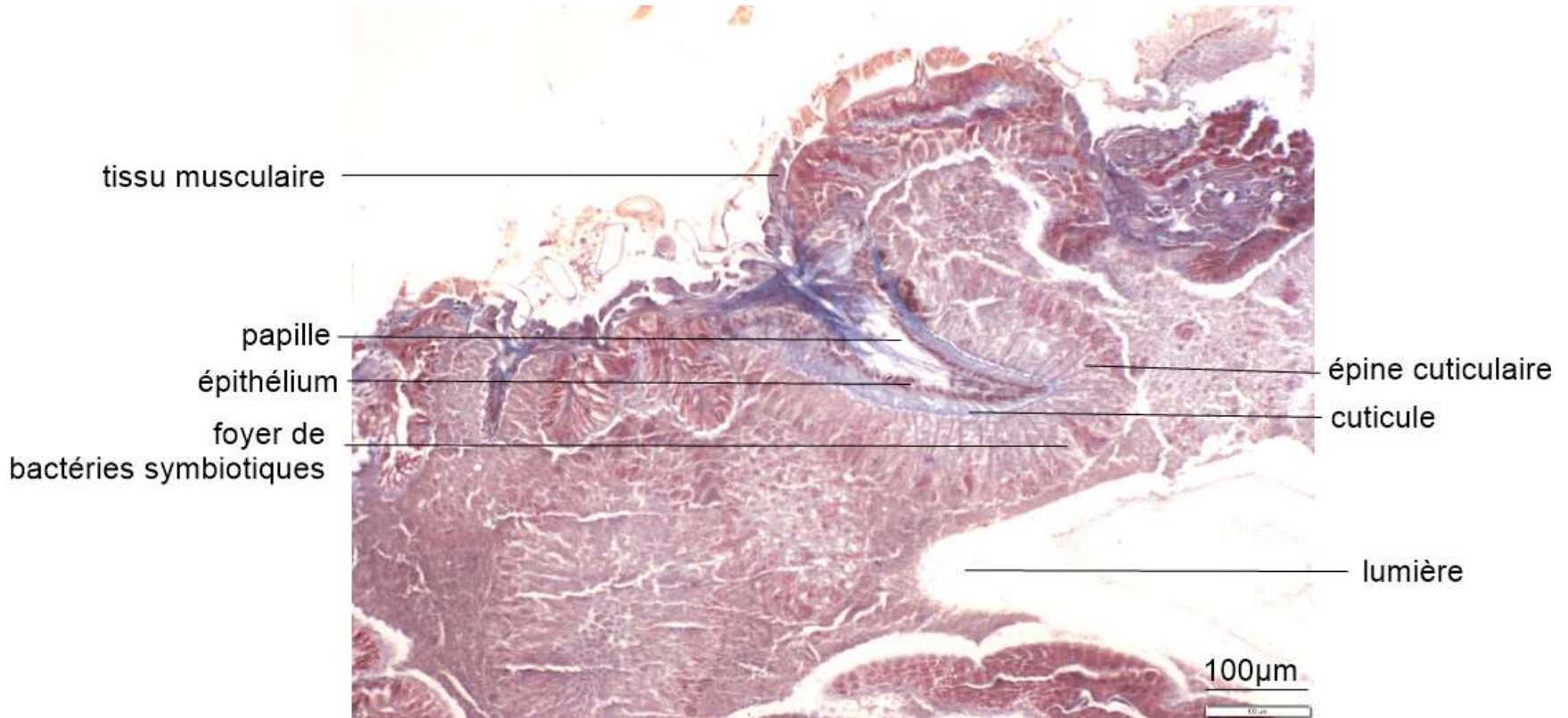
Le proctodeum, la chambre filtrante et le rectum

- constitué du **pylore**, de l'**iléum** et du **rectum**
- Le pylore forme parfois une **valve** entre le mésentéron et le proctodeum
- Les tubes de Malpighi émanent le plus souvent de la région pylorique.
- Chez la plupart des insectes, l'iléum est un tube étroit aboutissant au rectum
- Parfois, sa partie postérieure est très différente et est appelée **colon**.
- Chez les insectes abritant des **symbiotes microbiens**, l'iléum possède quelques diverticules appelés **panse**, pour les héberger.

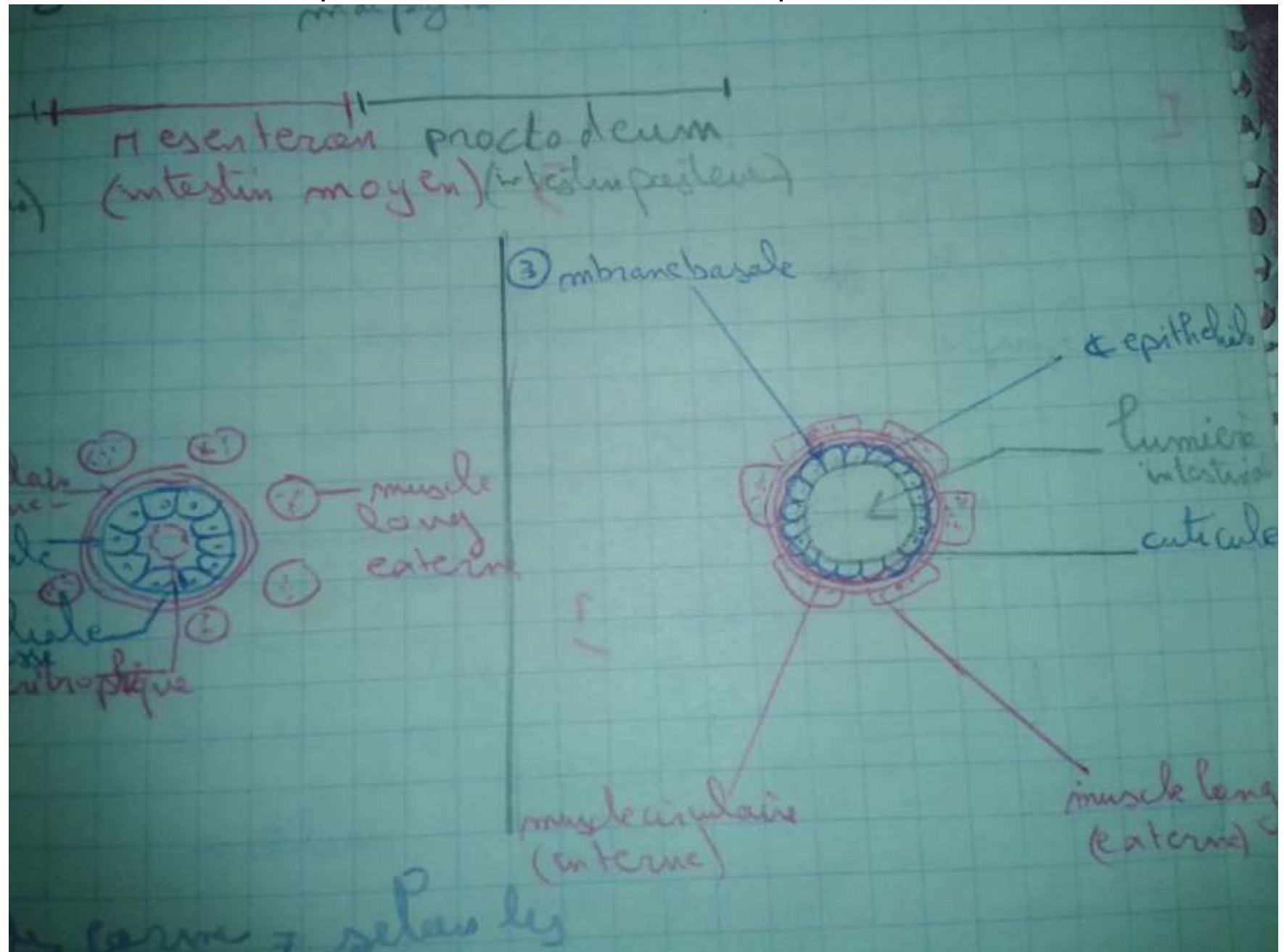
- C'est le cas des **termites**, des larves de **Scarabéidés** (chambre de fermentation), des **criquets** et des **blattes** hébergeant une flore bactérienne importante.
- Le rectum, correspondant à la section terminale avant l'anus, est généralement un large sac
- L'**intima** du rectum est perméable à l'eau, aux sels minéraux, aux sucres et aux acides aminés
- Avec les tubes de Malpighi, l'iléum et le rectum constituent le **système excréteur** de l'insecte

- Les Hémiptères, opophages, doivent ingérer un grand volume de liquide pour compenser la faible concentration en nutriments que ces liquides présentent comparativement aux feuilles, tiges...
- Des modifications de leur tube digestif leur permettent souvent une rapide élimination de l'excès d'eau ingéré.
- Chez de nombreux insectes (certains pucerons, cochenilles, cicadelles...), la partie antérieure du mésentéron forme une sorte de **vessie** qui entoure la partie postérieure de l'intestin moyen et une partie des tubes de Malpighi, modification appelée **chambre filtrante** (fig.)

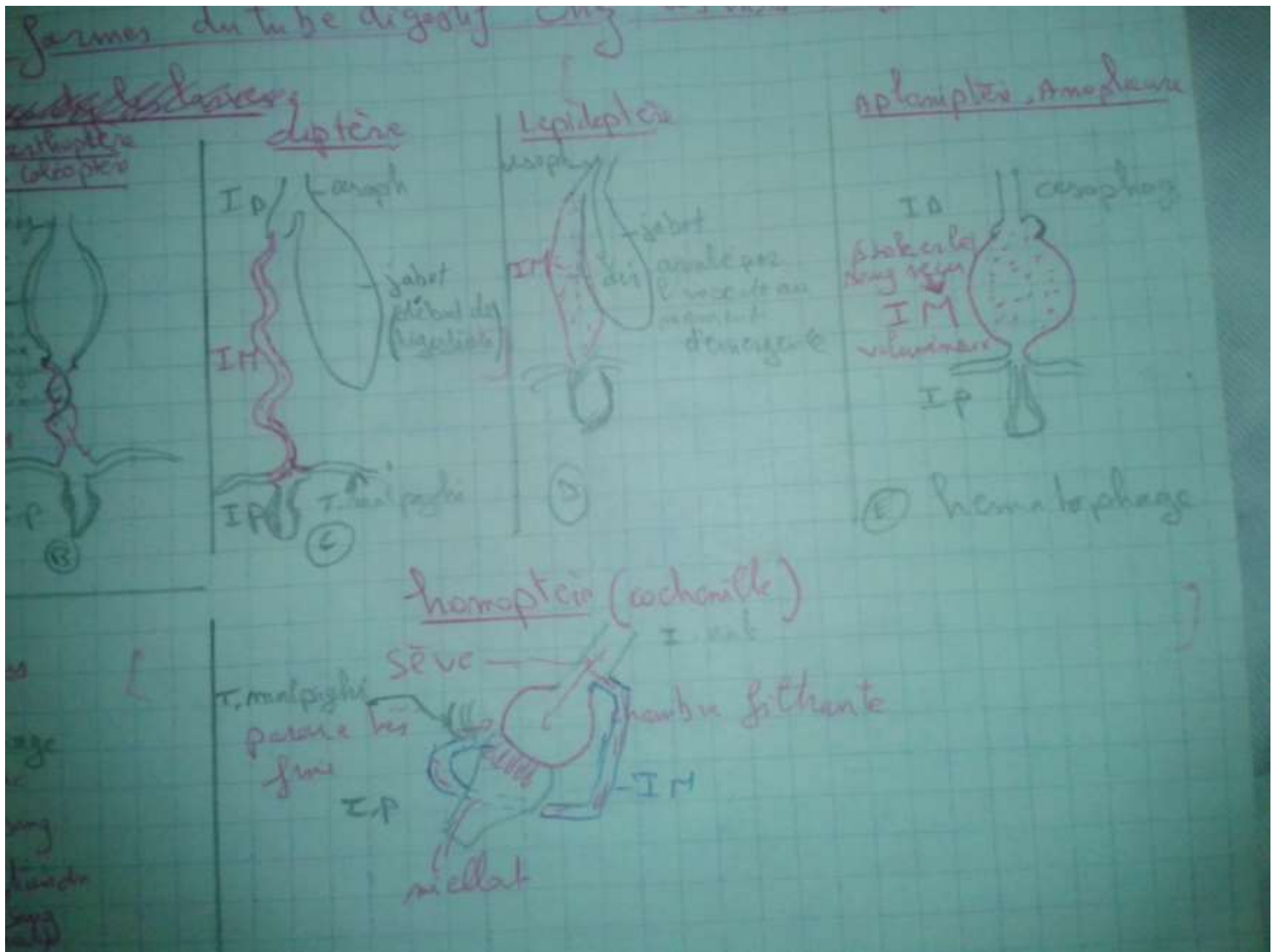
Iléon de Grillon en coupe longitudinale (Collection de l'ENS de Lyon) Copyright : 2017 Mikail Ferrandi Oulony Mendy Axel Tyburn Marlène Vaury



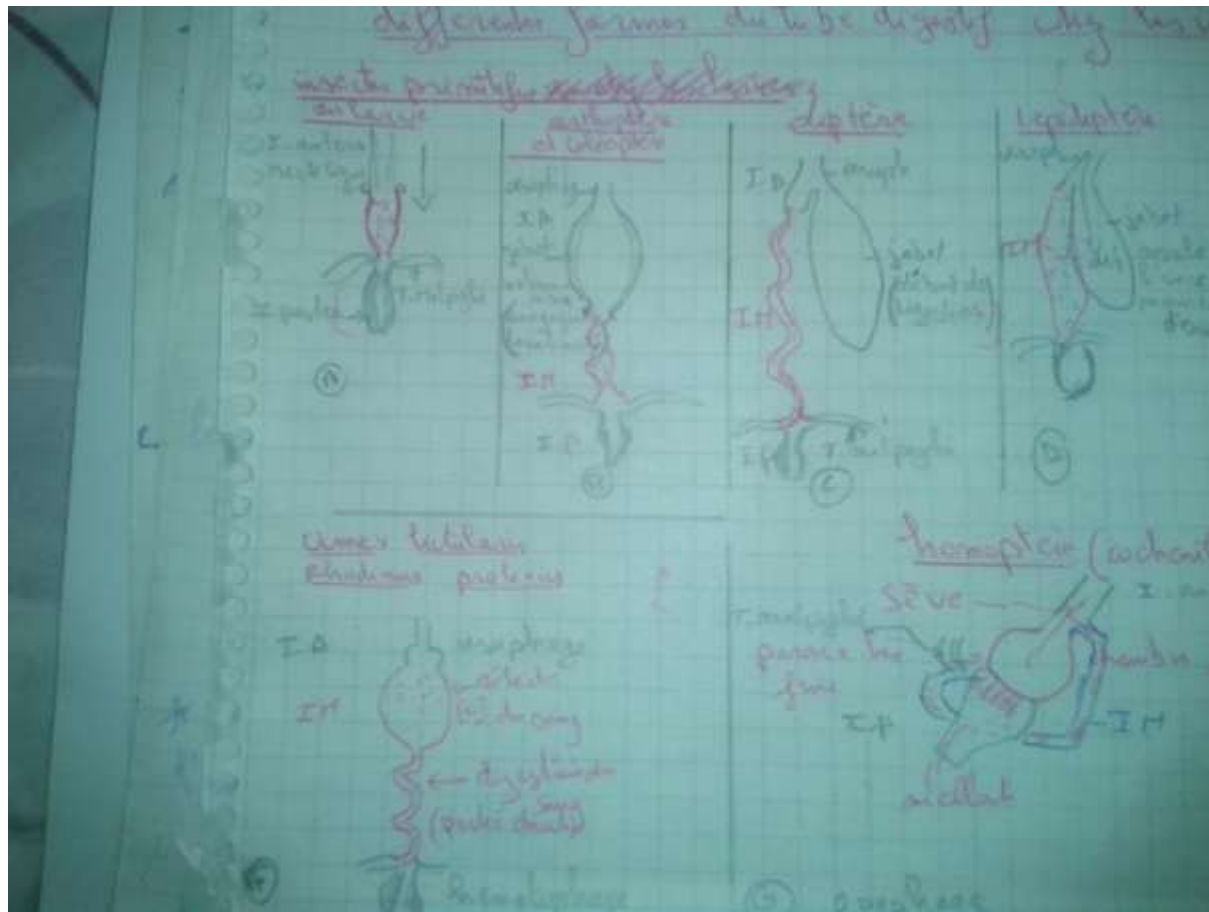
Coupe transversale au niveau du proctodeum



Différentes formes du tube digestif chez les insectes



Différentes formes du tube digestif chez les insectes



Les caeca et « bactériomes » para-digestifs

- Beaucoup d'insectes possèdent des diverticules à la partie antérieure ou postérieure du mésentéron, appelés **caeca gastriques** pour héberger des **bactéries symbiotiques**
- Pour la plupart des insectes, les micro-organismes symbiotiques sont également hébergés dans des cellules spécialisées appelées **mycétoctes** (levures) ou **bactériocytes** (bactéries) et regroupées en un organe appelé **mycétome** ou **bactériome** respectivement
- Cet organe est fréquemment associé au tube digestif, aux tissus adipeux et aux tubes de Malpighi

L'ÉVOLUTION

DU TUBE DIGESTIF DES INSECTES

- En fonction du type de nourriture et du mode de vie des insectes, les tubes digestifs ont été modifiés en conséquence
- les **Collemboles** et beaucoup de larves d'**endoptérygotes** ont un **simple canal alimentaire**, avec de très légères modifications au niveau des régions correspondant à la valvule cardiaque et à la valve pylorique.
- Les tubes digestifs les plus évolués sont ceux des insectes broyeurs comme les **Orthoptères**, les **Odonates**, les **Hyménoptères** et beaucoup de **Coléoptères** qui présentent
 - jabot large
 - gésier spécialisé en aliments semi-broyés.
 - caeca gastriques et rectum élargi

- Certains insectes opophages ou hematophages, (**Siphonaptères** et beaucoup d'**Hétéroptères**), le mésentéron est élargi
- Beaucoup de **Sternorhynques** (Hémiptères): chambre filtrante présente
- Insectes aquatiques (larves de libellules): branchies associées au rectum permettent à la larve d'acquérir l' O₂ de l'eau circulant dans un rectum élargi

- Des modifications du tube digestif ont lieu également pour une même espèce selon son stade de développement
 - pour les larves de **Névroptères** et de certains **Hyménoptères**, le mésentéron est un cul-de-sac, non lié au proctodeum jusqu'à formation de chrysalide → aliments excrétés seulement à l'émergence de l'adulte
 - termites et larves de Scarabéidés: iléum est modifié pour contenir des organismes symbiotiques

MICRO-ORGANISMES ET TUBE DIGESTIF, ENTRE SYMBIOSE ET PATHOGÉNIE

- micro-organismes ingérés lors de prise de nourriture → flore intestinale présente pour la + part des insectes
- **Sauterelles**: tube digestif stérile à l'éclosion, mais acquièrent 1 flore bactérienne augmentant en nombre et diversité au cours de leur vie
- dans de nombreux cas la flore digestive n'intervient pas dans la nutrition de l'insecte mais reflète tout simplement la microflore présente à la surface des plantes hôtes ou à l'environnement dans lequel vit l'insecte
- Dans d'autres cas, la flore digestive intervient intensément dans la nutrition de l'insecte
- **Criquets**: bactéries dans proctodeum → digérer des polysaccharides de plantes comme pectine...
- Ces bactéries leur procurent même des acides gras à chaînes courtes
- larves de **Scarabéidés**: digérer la cellulose dont ils se nourrissent via leurs bactéries digestives
- **Termites**: flore digestive leur permet de fixer l' N_2 atmosphérique

La digestion

- Les insectes doivent réduire les macromolécules ingérées en petites molécules + assimilables ou, pour les insectes **phloémophages**, transformer des petites molécules en d'autres - ou + en faible quantité dans leur alimentation
- C'est le rôle des **enzymes digestives**, soit par les **bactéries** de la flore digestive ou les **symbiotes** intracellulaires
- Les enzymes impliquées dans la digestion sont sécrétées par la **salive** et par l'**épithélium** du mésentéron.

- Beaucoup d'insectes réalisent une digestion dans le **lumen** du tube digestif
- La + part d'entre eux doivent digérer des protéines, des sucres et des lipides grâce aux enzymes dépendant du type d'alimentation
- **Phloémophages**: faible activité protéolytique digestive car sève contenant peu de protéines mais des acides aminés libres et peptides.

- La digestion a lieu principalement dans le lumen du **mésentéron**, mais 1 partie de la digestion débute dans le **stomodeum**
- Au sein du mésentéron, certaines enzymes comme les **amylases** et les **trypsines** passent aisément au travers de la **matrice péritrophique** et la digestion débute dans la zone **endopéritrophique** (lumière de la matrice péritrophique)
- Pour d'autres enzymes ne traversant pas matrice péritrophique (**carboxypeptidases** et **α -glucosidases**): digestion dans **espace ectopéritrophique**

- La digestion des protéines est réalisée par:
 - **endopeptidases**: serines; protéases; trypsines; cathepsines; chymotrypsines
 - **exopeptidases**: carboxypeptidases; aminopeptidases
- Parmi les sucres ingérés: **di** ou **polysaccharides**:
 - Disaccharides: **saccharose**; **maltose**; **cellobiose**
enzymes impliquées: **α -glucosidases**
 - Polysaccharides: **cellulose** **endoglucanases**;
exoglucanases; **β -glucosidases**

- La digestion des lipides est la + méconnue chez les insectes
- Le mésentéron produit plusieurs estérases
- Chenilles de papillon: galactosyldiglycérides, phosphatidylglycérols et phosphatidylcholines hydrolysés en di ou monoacylglycérides et acides gras libres

L'absorption

produits de digestion: absorbés au travers du **mésentéron**

- **sels minéraux**: **proctodeum**, absorption peut être:
 - **Passive**: lors de l'établissement par l'organisme d'un gradient de concentrations de l'intérieur vers l'extérieur du tube digestif: diffusion de la + forte à la + faible concentration
 - **Active**: dépend d'un processus métabolique luttant contre le gradient de concentrations via une pompe **ATPase** (cas du mouvement de K⁺) est couplé avec celui des acides aminés AA, permettant leur incorporation dans les cellules
- **eau** absorbée à la fois par **mésentéron** via les aliments et ensuite par **rectum** via les excréments

- Son processus d'absorption au niveau du mésentéron dépend de l'établissement d'un **gradient osmotique** au travers de l'épithélium par éjection ionique dans le lumen
- Inversement, au niveau du rectum, une pompe ATPase membranaire produit l'énergie nécessaire pour faire entrer les ions et les AA dans cellules, créant une augmentation de pression osmotique et induisant l'incorporation d'eau dans cellules
- **Nutriments**: principalement absorbés au travers de **l'épithélium du mésentéron**.
- **AA**: diffusés à travers **épithélium** grâce à un **gradient de concentrations** et incorporés dans cellules épithéliales par un système de transport membranaire couplé à un mouvement de cations (K^+)

- Consécutivement, ils arrivent en quantités non négligeables dans proctodeum où ils sont réabsorbés au travers de l'épithélium rectal via 1 système de **co-transport Na** dépendant
- **Sucres**: absorbés principalement /forme de **monosaccharides**
- Dans la +part des cas, ils sont absorbés passivement par **gradients de concentrations**
 - **glucose** rapidement converti en **tréhalose** dans tissus adipeux entourant tube digestif
 - **mannose** et **fructose** converti + lentement
- **Lipides**: absorbés sous forme d'A. gras et véhiculés dans hémolymphe par 1 système de **lipoprotéines** semblable à celui des mammifères, mais transportant **phospholipides** et **diacylglycérides** (au lieu des triglycérides chez les mammifères) jusqu'au corps gras
- **ions inorganiques**: Na et Ca absorbés au travers du mésentéron et rectum

Vue schématique du trajet des nutriments et de leurs déchets chez les insectes (d'après Daly et al., 1998).

