

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
 °° SCIENCES DE LA VIE °°
 >> Cours <<

Chapitre 5

Les cellules au sein d'un organisme

Objectifs : extraits du programme

SV-C La cellule dans son environnement (BCPST 1)	
La cellule est l'unité structurale et fonctionnelle du vivant. L'objectif est de présenter les grands traits de l'organisation d'une cellule (membranes, compartiments cellulaires, cytosquelette) et de la matrice extracellulaire qui l'entoure, en envisageant leurs aspects dynamiques afin de faire émerger les grandes lignes de leur fonctionnement. L'organisation fonctionnelle des cellules est abordée avec un nombre limité d'exemples, préférentiellement l'entérocyte de Mammifères, la cellule du parenchyme palissadique d'une Angiosperme et une bactérie Gram - (<i>Escherichia coli</i>, <i>Rhizobium</i> sp.). L'objectif n'est pas de réaliser une monographie à partir de chaque exemple proposé mais de les utiliser comme support pour illustrer le concept de cellule tout en montrant une diversité d'organisation et de fonctionnement, sans toutefois chercher l'exhaustivité des particularités de chaque type cellulaire. Cette vision d'ensemble est complétée par les autres parties concernant le métabolisme énergétique (SV-E) et la génomique structurale et fonctionnelle (SV-F). Ces trois parties s'appuient sur les fondamentaux abordés dans la partie sur les biomolécules (SV-D). <i>In fine</i>, cet ensemble offre une vision intégrée de l'organisation fonctionnelle de la cellule dans son « milieu », qu'il s'agisse d'un organisme unicellulaire ou pluricellulaire.	
Savoirs visés	Capacités exigibles
SV-C-1 Les cellules au sein d'un organisme	
L'état pluricellulaire peut être décrit à différentes échelles : tissu, organe, appareil et individu. Différentes techniques de microscopie (optique, à épifluorescence et électronique -MEB et MET-) permettent d'étudier l'organisation des cellules et des tissus.	- Illustrer les différentes échelles en utilisant l'entérocyte et la cellule du parenchyme palissadique. - Comparer les techniques de microscopie (types d'objets observés, taille des structures observées, domaines d'application). - Évaluer les dimensions d'une structure observée à partir de la connaissance de l'ordre de grandeur de quelques objets biologiques courants (divers types cellulaires). - Exploiter une coupe d'intestin de Mammifère et une coupe transversale de feuille d'Angiosperme pour identifier les principaux types de tissus et préciser les relations structure-fonction.
Précisions et limites : Les principes généraux et les objectifs des différentes techniques de microscopie sont à connaître. Le détail du traitement des échantillons pour la microscopie n'est pas à mémoriser. La technique de microscopie confocale et ses dérivés ne sont pas à connaître. Les ordres de grandeur à connaître se limitent aux types cellulaires étudiés dans les différentes parties du programme.	
Les jonctions et les interactions cellule-matrice assurent la cohésion et participent à la communication entre cellules animales.	- Identifier les principaux types de jonctions intercellulaires sur des clichés de microscopie électronique. - Schématiser l'organisation moléculaire en réseau des

Pour les Angiospermes, ces fonctions sont assurées par la paroi et les plasmodesmes. Les matrices extracellulaires présentent une structure en réseau dont l'organisation et la composition varient en fonction des organismes et des tissus. Les matrices extracellulaires peuvent être rigidifiées notamment par une imprégnation de lignine ou de substances minérales.	matrices extracellulaires animales d'un tissu conjonctif et d'un tissu épithélial et celle d'une paroi pectocellulosique
Précisions et limites : On limite les matrices extracellulaires animales au cas des Mammifères et les matrices extracellulaires végétales à la paroi (primaire et secondaire) des Angiospermes. Pour les processus de synthèse des constituants des matrices extracellulaires, on se limite à l'exemple de la cellulose de la paroi végétale.	
Certaines cellules d'un organisme pluricellulaire eucaryote interagissent (échanges de matière et d'information) avec d'autres organismes.	- Identifier les partenaires d'une association interspécifique impliquant des microorganismes par observation microscopique (microbiote intestinal, nodosité).
Précisions et limites : On se limite à l'exemple du contact entre <i>E. coli</i> et l'épithélium intestinal et au cas des microorganismes de la rhizosphère (<i>Rhizobium</i>).	
Liens : Vue d'ensemble sur un organisme animal et végétal et sur les organismes unicellulaires (SV-A) Diversité des tissus des Métazoaires et des Angiospermes (SV-B et SV-H) Organisation du cytosquelette (SV-C-2) Polyosides, protéines (SV-D-2) Modalités de la communication intercellulaire (SV-I) Les sols (BG-B)	

Introduction générale sur la cellule

La **cellule** est la **plus petite unité de structure et de fonctionnement d'un être vivant, limitée par une membrane et pourvue d'une information génétique portée par l'ADN**. On peut distinguer deux grands types cellulaires :

- La **cellule eucaryote** : **cellule compartimentée dont l'ADN est enfermé dans un noyau et dont les compartiments présentent une spécialisation fonctionnelle**. On trouve aussi un peu de matériel génétique dans certains compartiments (mitochondries, plastes).
- La **cellule procaryote** : **cellule souvent peu ou pas compartimentée** (mais on trouve des exceptions comme les Cyanobactéries) **dont l'ADN est situé dans une zone du cytoplasme nommée nucléoïde**. On trouve aussi un peu de matériel génétique dans les **plasmides**, **petits morceaux circulaires d'ADN**.

Les **organismes** peuvent être **uni-** (**constitués d'une seule cellule**) ou **pluricellulaires** (**constitués de nombreuses cellules**). La **présent chapitre** invite clairement à se focaliser sur **l'état pluricellulaire** (**encadré A**), mais pas uniquement. Notez qu'en **deuxième année**, un **chapitre sur les organismes unicellulaires** permettra de compléter les notions vues en **première année**.

La plupart des 'procaryotes' sont unicellulaires et non compartimentés, mais nous verrons que ces points peuvent être nuancés.

Au sein des **cellules eucaryotes**, le programme invite à distinguer le **type « animal »** et le **type « végétal (chlorophyllien) »**. Le **premier type de cellule** sera examiné au travers principalement de l'exemple de l'**entérocyte (cellule absorbante de l'épithélium de l'intestin grêle)** de Mammifères alors que le **second** aura pour support principal la **cellule du parenchyme foliaire palissadique** d'Angiospermes Eudicotylédones. Concernant la cellule bactérienne, on demande d'utiliser surtout l'exemple du **colibacille Escherichia coli** ou d'un **Rhizobium**.

D'autres types cellulaires compléteront ce cours.

Notons dès à présent que la **pluricellularité** implique :

- Une **organisation** en **tissus, organes, etc.**
- Une **coopération** ainsi qu'une **coordination** de l'activité des cellules. Les **communications intercellulaires** seront traitées en **deuxième année**.
- Un processus de **développement** qui a permis, **à partir d'une cellule originelle issue de la fécondation et qu'on appelle zygote, de produire toutes les cellules d'un organisme adulte**. Les cellules subissent alors un processus de **différenciation**, c'est-à-dire qu'elles **acquièrent des caractéristiques structurales et fonctionnelles propres qui permettent leur spécialisation fonctionnelle**. Le **développement animal** et le **développement végétal** seront traités en **deuxième année**.

Comment les cellules s'organisent-elles en tissus et s'intègrent-elles, à la fois structuralement et fonctionnellement, dans un organisme ?

Les aspects pratiques sont traités dans le
TP SV C (Observations microscopiques de cellules et de tissus)

Les **tissus animaux**, dans un **supplément au TP SV C (et sa fiche)**

Les **tissus végétaux**, dans le **cours sur Fabacée (chapitre 2)** et une **fiche annexe du TP SV B1**

Encadré A La pluricellularité : réflexions préliminaires et tentative de conceptualisation

➡ La pluricellularité : l'impossible définition ?

➤ Pour le scientifique D. KAISER (2001), la **pluricellularité** ou **multicellularité** se définit comme **l'état d'un organisme composé de cellules multiples dont l'activité est coordonnée, qui sont en contact physique, ou dont la proximité spatiale leur permet d'interagir étroitement**. On peut ajouter qu'un **individu pluricellulaire** est généralement **constitué de cellules dérivant d'une cellule initiale (zygote) par divisions successives**.

➤ Ainsi, une **colonie cellulaire** (**ensemble de cellules accolées ou regroupées, dérivant d'un individu initial par divisions ou plus souvent constitué de l'agglomération de plusieurs individus unicellulaires, mais demeurant largement autonomes dans leur fonctionnement**) ne peut être considéré comme un **organisme multicellulaire** dans la mesure où les cellules ne sont **pas ou peu coordonnées entre elles**.

➤ Il est néanmoins difficile de délimiter la **frontière** entre des **cellules « peu coordonnées entre elles »** et des **cellules « dont l'activité est coordonnée »** : les **cellules en colonies** présentent en effet toujours des **interactions interindividuelles** et la frontière avec une interaction plus importante est purement **subjective et appréciative**.

➤ La pluricellularité n'est donc **pas objectivable rigoureusement et unanimement** tant qu'un **consensus conceptuel** (avec des **critères précis**) n'a pas été proposé par la communauté scientifique.

➡ Les manifestations de la pluricellularité

➤ La **pluricellularité** peut supposer tout ou partie des **adaptations suivantes** (sans que la liste ne soit exhaustive) :

– Il y a toujours **regroupement de cellules** par des **liens structuraux** entre les cellules. Les cellules peuvent :

- être **attachées** ensemble par des **jonctions intercellulaires** (cas notamment des **Métazoaires**).
- être **liées** par des **matrices extracellulaires** comme des **parois** (cas chez les '**algues**' pluricellulaires, les **Embryophytes** ou encore les '**champignons**' pluricellulaires).
- être **agglomérées** au sein d'un **mucilage** (cas de certaines '**algues**' ou de certaines **Cyanobactéries**).
- présenter un **état coenocytique** où de **nombreux noyaux** partageant un **même cytoplasme** (cas des **thalles siphonnés** de certains '**champignons**' et certaines '**algues**' ou encore du **plasmode** des **Myxomycètes**).

– Il peut y avoir présence d'un **continuum des cytoplasmes** de **cellules adjacentes** ou **proches** : cela est permis par les **jonctions gap** chez les Animaux ou encore les **plasmodesmes** d'une partie des **Chlorobiontes** (dont les **Embryophytes**) et des **Algues brunes**, l'acquisition des **plasmodesmes** étant **convergente** chez ces deux lignées.

– Il y a mise en place d'une **communication entre cellules** qui peut faire appel à des **facteurs diffusibles** (phytohormones, facteurs paracrines animaux...), une **reconnaissance** par **contact** entre **cellules adjacentes** (cas de la **juxtacrinie animale**), une **dispersion de molécules informatives** par des **liquides circulants** (hormones animales, certaines phytohormones...) voire une capacité de **propagation d'une dépolarisation cellulaire** (cas de la **communication électrique** chez les **Métazoaires** par exemple).

– Les **cellules coopèrent fonctionnellement**, pouvant constituer ou non des **tissus** voire des **organes différenciés** : l'organisme pluricellulaire est alors une **mosaïque de cellules spécialisées** dont l'activité individuelle et coordonnée permet le **fonctionnement global de l'être vivant**.

– L'état pluricellulaire peut être dû à une **simple agrégation de cellules** (colonies de cellules) mais, la plupart du temps, une **pluricellularité différenciée** implique que toutes les **cellules** proviennent par **divisions successives** d'une **cellule initiale (zygote)**. Dans ces **organismes**, les cellules

connaissent généralement une **prolifération par mitoses**, un **accroissement de leur taille (croissance)** et souvent une **différenciation** ; ces trois processus permettent l'**édification de l'organisme pluricellulaire**, phénomène que l'on nomme **développement**.

➔ Un caractère clairement convergent

(!) Voir le complément du chapitre 18 : Panorama de la diversité du vivant

➤ De **nombreuses lignées** peuvent remplir tous les **critères** que nous venons d'exposer ou, plus souvent, une partie des **critères** seulement : la **pluricellularité** est donc une **réalité aux visages multiples** apparue de **nombreuses fois** et doit être interprétée comme une **convergence**, sans qu'il soit possible de **positionner avec précision les événements d'acquisition**. D'après GROSBERG & STRATHMANN (2007, *The Annual Review of Ecology*), la **pluricellularité** pourrait être apparue à partir de l'état unicellulaire **25 fois chez les Eucaryotes**.

➤ On connaît du reste au moins **trois groupes de Bactéries** chez lesquelles une **forme rudimentaire de pluricellularité** est observable (dont les **Cyanobactéries**). Les modalités d'acquisition seraient à examiner au cas-par-cas et les scénarios qui ont pu être proposés sont souvent très spéculatifs.

Important : une vue d'ensemble sur deux organismes pluricellulaires est proposée :

- dans le **chapitre 1 (Vache)**
- dans le **chapitre 2 (Fabacée)**

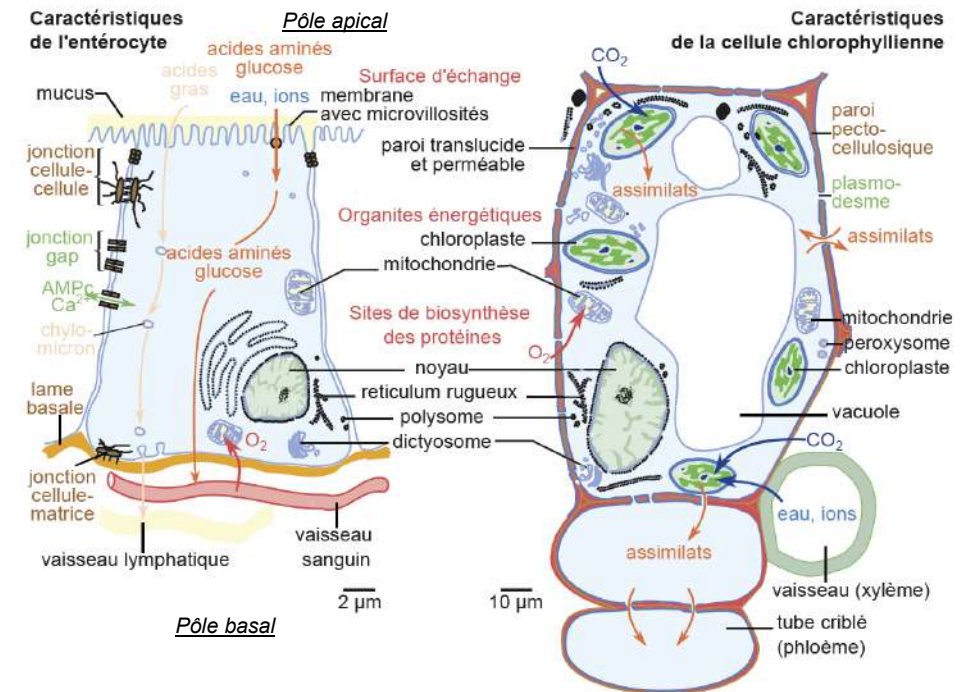
I. Des cellules spécialisées qui s'intègrent structuralement et fonctionnellement dans un organisme et que l'on peut étudier par des techniques de microscopie

Capacités exigibles

- ✓ **Illustrer** les différentes échelles en utilisant l'entérocyte et la cellule du parenchyme palissadique.
- ✓ **Comparer** les techniques de microscopie (types d'objets observés, taille des structures observées, domaines d'application).
- ✓ **Évaluer** les dimensions d'une structure observée à partir de la connaissance de l'ordre de grandeur de quelques objets biologiques courants (divers types cellulaires).
- ✓ **Exploiter** une coupe d'intestin de Mammifère et une coupe transversale de feuille d'Angiosperme pour identifier les principaux types de tissus et préciser les relations structure-fonction.

A. Les cellules dans les organismes pluricellulaires, des entités spécialisées

- Dans un **organisme pluricellulaire (encadré A)**, les cellules sont généralement **spécialisées (figure 1)**.



▲ FIGURE 1. **Organisation et fonctionnement basique d'un entérocyte de Mammifère et d'une cellule du parenchyme palissadique d'Angiosperme.** D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

1. La spécialisation cellulaire, une donnée structurale et fonctionnelle

- On peut dire d'une **cellule** qu'elle est **spécialisée** lorsqu'elle **possède des caractéristiques structurales et fonctionnelles propres qui lui permettent d'assurer une ou des fonctions précises dans l'organisme que les autres cellules n'assurent pas ou, en tout cas, pas selon cette combinaison.**

a. L'exemple de l'entérocyte : une cellule animale mammalienne polarisée spécialisée dans l'absorption intestinale

On s'appuiera sur le **schéma de l'entérocyte** proposé dans le **chapitre 6**.

- L'**entérocyte** (figures 1-2) est une **cellule bordant la lumière de l'intestin des Mammifères (et d'autres Vertébrés) qui absorbe l'essentiel des nutriments organiques, ainsi qu'une partie de l'eau et des ions.**
- Sans faire une **monographie excessive**, on peut noter ces éléments de **relations structure-fonction** dans sa **spécialisation**, tous à mettre en lien plus ou moins étroit avec une **polarité apico-basale**, c'est-à-dire une **organisation et un fonctionnement polarisés en fonction d'un pôle apical** [côté **lumière**] et d'un **pôle basal** [côté **sanguin**] voire **baso-latéral** :
 - La présence, face **apicale**, de **microvillosités**, **fins prolongements cytoplasmiques peu motiles à rôle d'absorption de substances (1-2 µm)**, causés par un **arrangement particulier du cytosquelette**, augmentant d'un **facteur 600 l'absorption** de nutriments par rapport à une surface lisse. Leur **continuum** constitue la « **bordure en brosse** ».
 - La présence, côté **basal**, de **capillaires sanguins**, récupérant l'essentiel des **nutriments**, et de **capillaires lymphatiques**, récupérant les **chylomicrons**.
Revoir **chapitre sur la Vache** (chapitre 1)
 - La présence, côté **latéral**, de **jonctions** (voir II) assurant
 - la **cohésion de l'épithélium** en lien avec le **cytosquelette** (**toutes jonctions**)
 - l'**échange de matière [molécules organiques]** et d'**information [notamment seconds messagers]** entre cytosols (**jonctions gap**)
 - et la **réduction du transport paracellulaire** (**jonctions étanches**).

Au niveau d'un **épithélium à fonction d'échanges**, on peut distinguer :

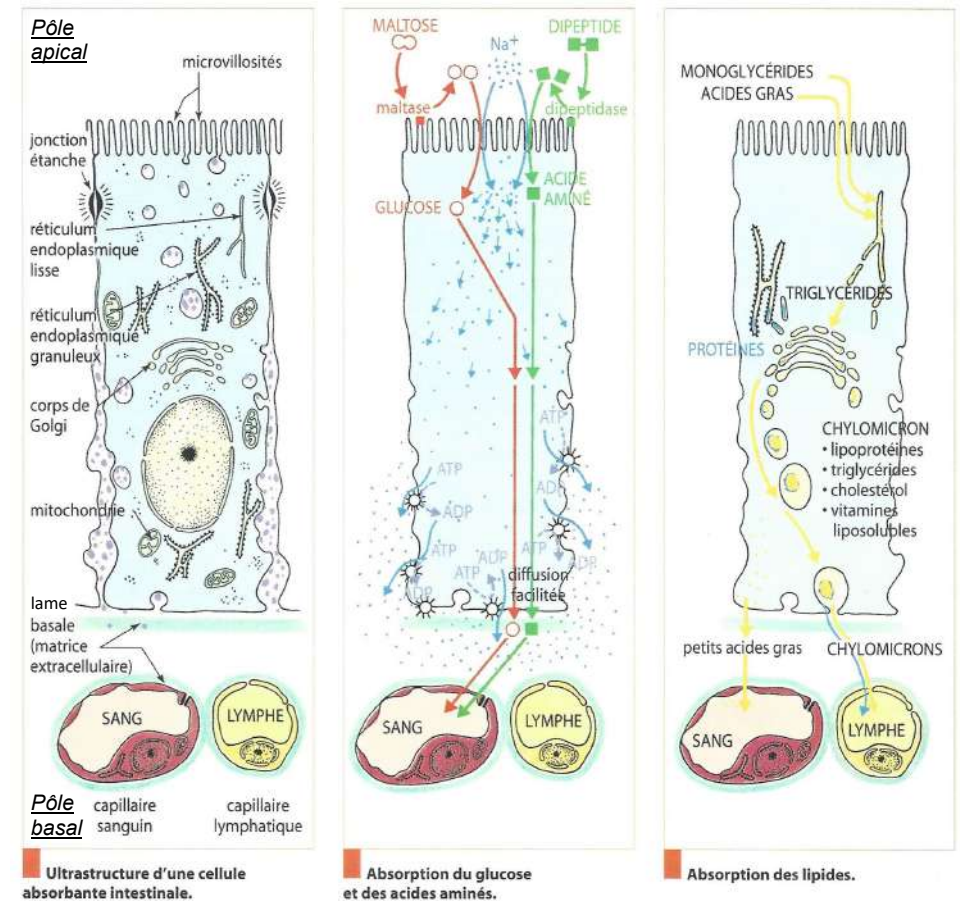
- Le **transport transcellulaire**, **déplacement de substances au travers d'un épithélium qui s'effectue au travers des cellules, par échanges transmembranaires et/ou cytosols.**
(!) Ce transport est clairement **majoritaire**.

Voir le **chapitre sur les membranes** (chapitre 7)

- Le **transport paracellulaire**, **déplacement de substances au travers d'un épithélium qui s'effectue entre les cellules, souvent.**

(!) Longtemps **négligé** voire **ignoré**, cette modalité est sans doute plus **contributive** que ce que l'on a longtemps estimé et intéresse de plus en plus les biologistes concernant les flux de matière. Ce mécanisme est néanmoins admis de longue date comme un aspect majeur de la **diapédèse, migration des leucocytes entre des cellules épithéliales (notamment typiquement des cellules endothéliales) en général avec écartement des complexes jonctionnels.**

- Une **répartition grossièrement polarisée de certaines organites** (noyau, REG, Golgi... plutôt en position basolatérale), même si ce **trait est variable et bien moins net** que pour une **cellule sécrétrice** (ex. cellule acineuse du pancréas).
- La présence, côté basal, de **jonctions cellule-matrice** (**hémidesmosomes**) assurant l'ancrage de la **cellule** sur la **matrice** qui est ici une **lame basale**.
- Une **répartition polarisée des transporteurs** (figure 3), assurant le **flux polarisé et sélectif de nutriments**, ou encore des **enzymes** (certaines sur la **bordure en brosse**, d'autres dans la **cellule** même) (figure 2).

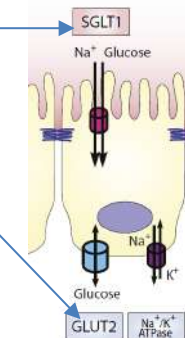


▲ **FIGURE 2. L'absorption intestinale : une vision simplifiée.**

D'après PÉRILLEUX et al. (2002).

SGLT (Sodium GLucose Transporter) :
réalise un **transport actif secondaire** (cotransport avec le Na⁺) du glucose contre son gradient, permettant son entrée dans l'entérocyte.

GLUT (GLucose Transporter) :
réalise un **transport facilité** (c'est une perméase) du glucose selon son gradient vers le liquide interstitiel.



◀ **FIGURE 3. Le transport polarisé du glucose dans l'entérocyte.**

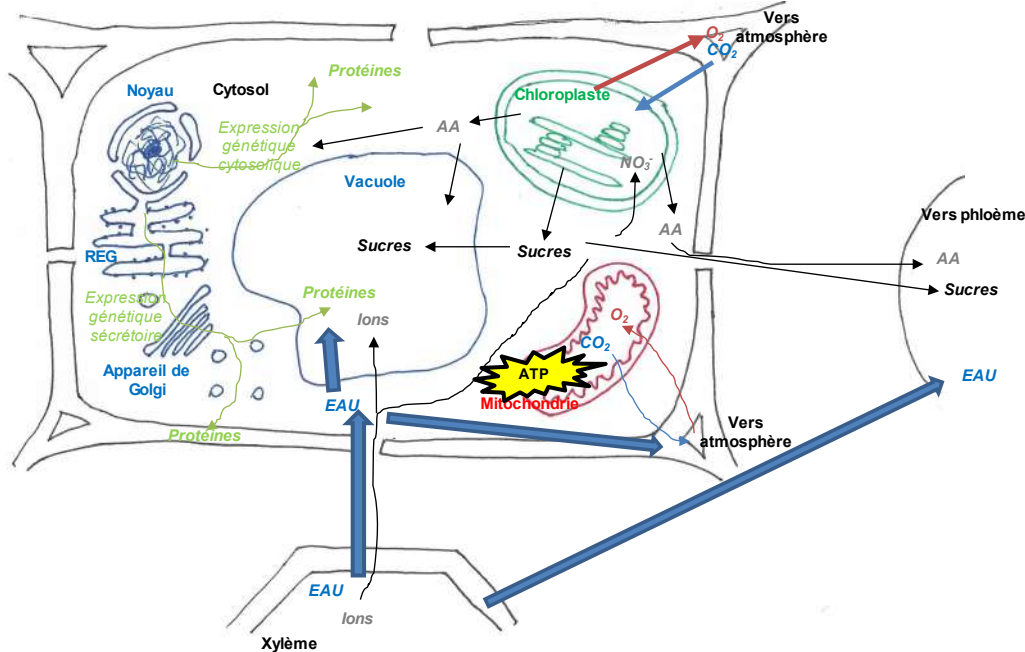
Le fonctionnement des transports transmembranaires ainsi qu'un focus sur ceux qui interviennent dans l'entérocyte seront proposés dans le **chapitre 7 sur les membranes**.

D'après EDELBLUM & TURNER (2015).

b. L'exemple de la cellule du parenchyme palissadique (CPP) foliaire : une cellule végétale d'Angiospermes Eudicotylédones spécialisée dans la photosynthèse

On s'appuiera sur le schéma de la cellule palissadique proposé dans le chapitre 6.

- La cellule du parenchyme foliaire palissadique (qu'on abrégera – tout à fait informellement – en CPP) est une **cellule chlorophyllienne**, c'est-à-dire **riche en chloroplastes**, organites réalisateurs de la **photosynthèse**, synthèse de matière organique carbonée à la lumière à partir de matière minérale.



▲ FIGURE 4. Les flux de matière au sein d'une cellule chlorophyllienne : version très basique. Original. On a choisi une cellule réalisant l'assimilation des nitrates. Les flux d'ATP (ainsi que le flux d'eau respiratoire ou photosynthétique) ont été omis pour soulager la figure.

- Il s'agit d'une **cellule végétale typique**, somme toute assez faiblement spécialisée.
- La cellule n'est **pas polarisée structuralement** mais les flux sont **polarisés entre organites**, ou entre la cellule et divers **compartiments extracellulaires** (autres cellules, tissus conducteurs, méats...).
- On peut relever les **éléments de relation structure-fonction** suivants (figures 1 et 4) :
 - Les **plastides** sont des **chloroplastes**, **plastides réalisateurs de la photosynthèse** qui assurent également un **stockage journalier d'amidon** (réserve) qui peut être **converti en glucose** (et fructose) puis **saccharose** la nuit.
 - La **vacuole** est importante, ce qui :
 - Est une **marque de différenciation**,
 - Permet la **croissance végétale** (auxèse) car la **paroi** reste **fine**,

- Permet un **stockage transitoire** de **substances organiques** (saccharose, acides aminés...) en **journée** qui peuvent être **mobilisées la nuit**, fournissant ainsi la plante en **assimilats photosynthétiques** à toute heure.
- Proche du **xylème**, notamment pourvoyeur d'**eau** et d'**ions minéraux**.
- Proche du **phloème**, par le biais duquel l'**export de matière organique** – souvent sous forme de **saccharose** – en direction des **organes-puits** est assuré.

On verra dans le **chapitre consacré à la nutrition végétale** (chapitre 4) que la **charge du phloème** ne se fait **pas forcément par les plasmodesmes**, même si c'est une possibilité.

- Dont la **paroi** est **pourvue de méats** où l'**air**, avec lequel s'effectuent les **échanges gazeux** si importants dans une **cellule photosynthétique** où les besoins en CO_2 (et les rejets d' O_2) en journée sont conséquents.

2. La spécialisation cellulaire, fruit d'un processus de différenciation

- Le **développement animal** et le **développement végétal** seront vus en **deuxième année**.
- Notons néanmoins dès à présent que les **cellules spécialisées** sont des cellules **différenciées**. On appelle **différenciation** le **processus qui permet à une cellule indifférenciée d'acquérir des particularités structurales et fonctionnelles la rendant capables d'assurer une fonction précise (ou plusieurs) au sein d'un organisme pluricellulaire**.

B. L'intégration des cellules dans des tissus, des organes, des systèmes ou appareils et des organismes

1. Rappels : les différents niveaux d'organisation du vivant

- Vus dans les **chapitres 1 (Vache)** et **2 (Fabacée)**, rappelons ici les **niveaux d'organisation du vivant** (figure 5) :
 - Atome** : **très petite unité qui compose tout matériau constituée de protons, de neutrons et d'électrons**. Ordre de grandeur : 10^{-10} m (= 0,1 nm = 1 ångström = 1 Å).
 - Molécule** : **ensemble d'atomes liés entre eux par des liaisons covalentes**. Ordre de grandeur : 10^{-9} m (1 nm).

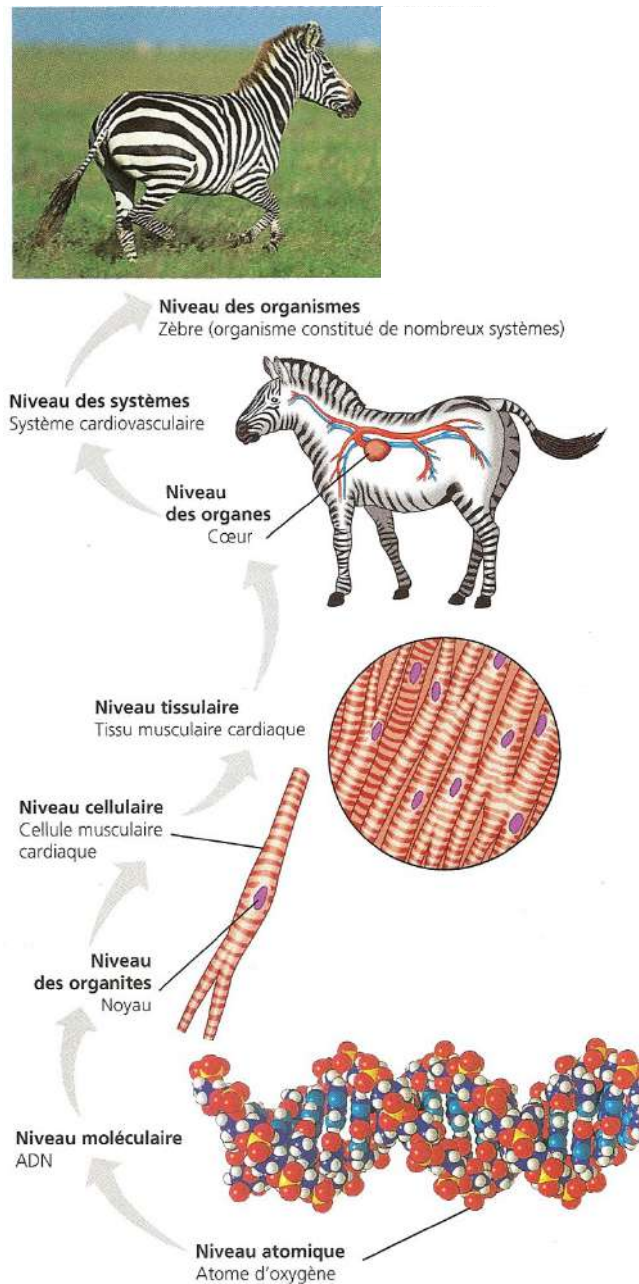
La notion d'édifice supramoléculaire

Au-dessus du **niveau moléculaire**, on peut citer les **édifices supramoléculaires** ou **structures supramoléculaires** (**même si le sens est un peu différent en chimie**) lorsque **plusieurs molécules biologiques** s'assemblent en **structures polymoléculaires plutôt stables remplissant une ou des fonctions établies**.

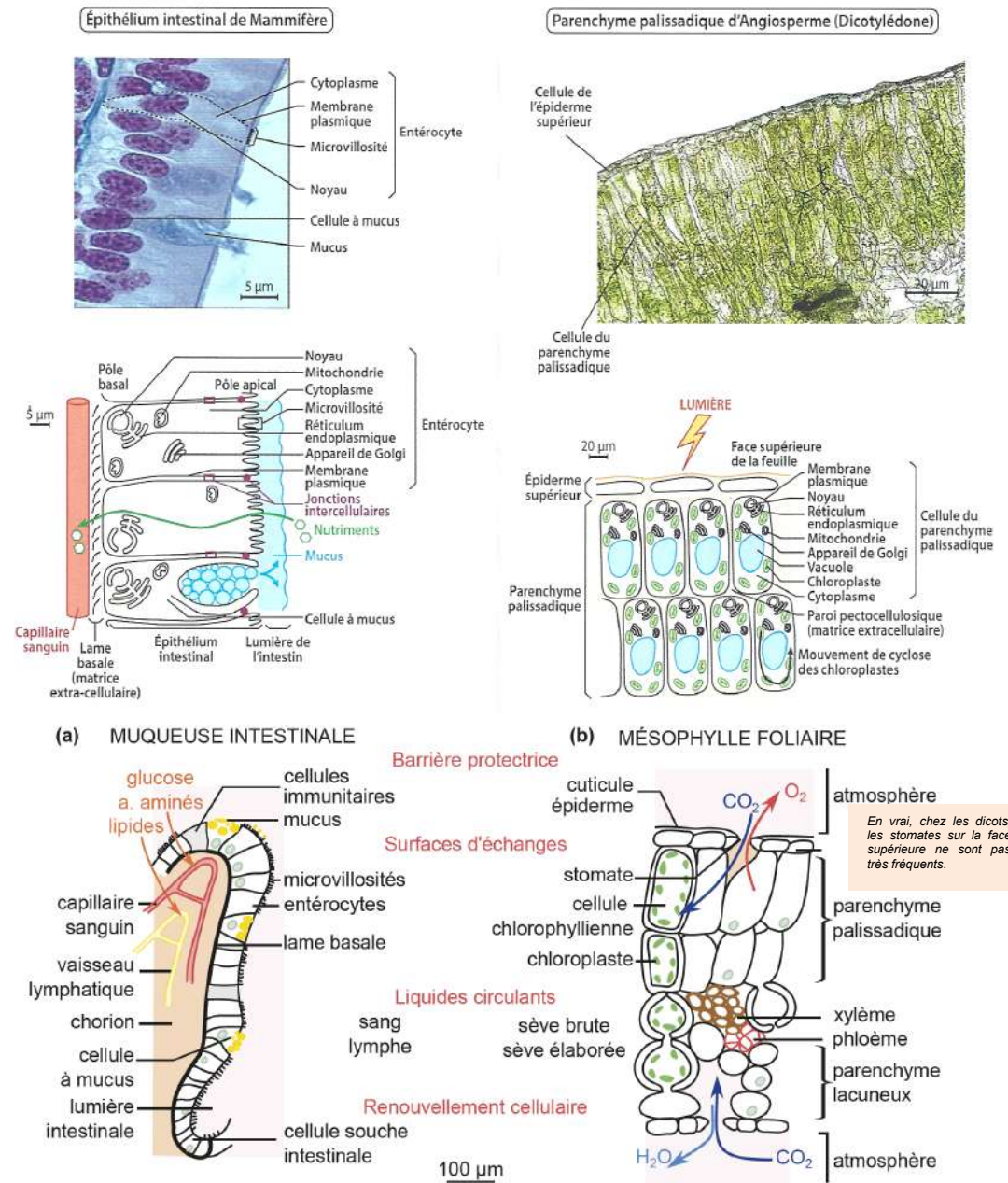
Exemples : **membrane biologique**, **matrice extracellulaire**, **éléments du cytosquelette**, **jonctions**...

- Compartiment cellulaire** : **portion de liquide située dans une cellule et séparée du reste de la cellule par une membrane**. Un ou plusieurs **compartiments** peuvent former un **petit organe cellulaire spécialisé dans une fonction** qu'on appelle **organite**. Ordre de grandeur : 10^{-6} m (1-5 μm ; jusqu'à 10 μm voire plus pour un **plaste** !).
- Cellule** : **unité structurale et fonctionnelle de base d'un être vivant, comprenant une information génétique, un cytoplasme et une membrane**.

Taille moyenne d'une cellule bactérienne typique : **1 μm**
 Taille moyenne d'une cellule animale typique : **10 μm**
 Taille moyenne d'une cellule végétale typique : **100 μm**



▲ FIGURE 5. **Niveaux d'organisation du vivant : de l'atome à l'organisme.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).



▲ FIGURE 6. **Tissus intégrant les exemples cellulaires étudiés.**
D'après DAUTEL *et al.* (2021) et PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

- **Tissu** : ensemble cohérent et localisé de cellules de même type, présentant la même structure générale et la même fonction.
Exemples animaux : épithélium, conjonctif dense...
Exemples végétaux : parenchyme, xylème, cambium...
- **Organe** : assemblage organisé de plusieurs tissus dans un ensemble fonctionnel qui assure une ou des fonctions précises au sein de l'organisme.
Exemples animaux : cœur, intestin grêle, œil...
Exemples végétaux : fleur, tige, feuille, racine...
- **Système** ou **Appareil** :
Chez les Animaux : ensemble d'organes coopérant dans la réalisation d'une grande fonction dans l'organisme. Exemples : appareil digestif, appareil respiratoire, système immunitaire...
Chez les 'végétaux' : ensemble d'organes correspondant à une zone particulière de la plante (éventuellement en lien avec un ensemble de fonctions). Exemples : appareil reproducteur, appareil végétatif, appareil aérien...
- **Organisme** ou **individu** : ensemble autonome de cellules qui croît, entretient des relations avec son environnement, se reproduit seul ou avec un semblable, échange de la matière et de l'énergie avec son environnement, maintient un fonctionnement et une organisation stables à courte échelle de temps, et meurt.

2. Des cellules associées dans un tissu, ensemble homogène de cellules

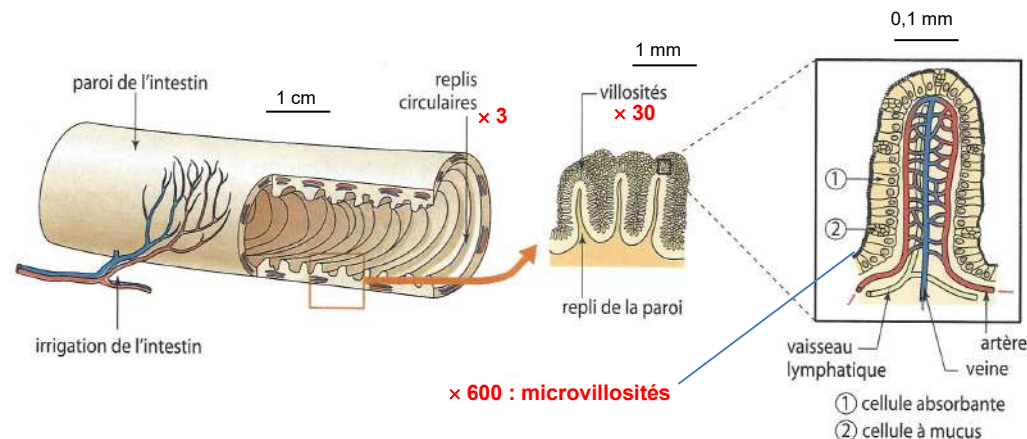
Il faut impérativement revoir – ET MAÎTRISER – les TP et leurs compléments sur les **tissus** !

- On appelle **tissu** un ensemble cohérent et localisé de cellules de même type, présentant la même structure générale et la même fonction.
- Visions d'ensemble : figure 6 (page précédente).

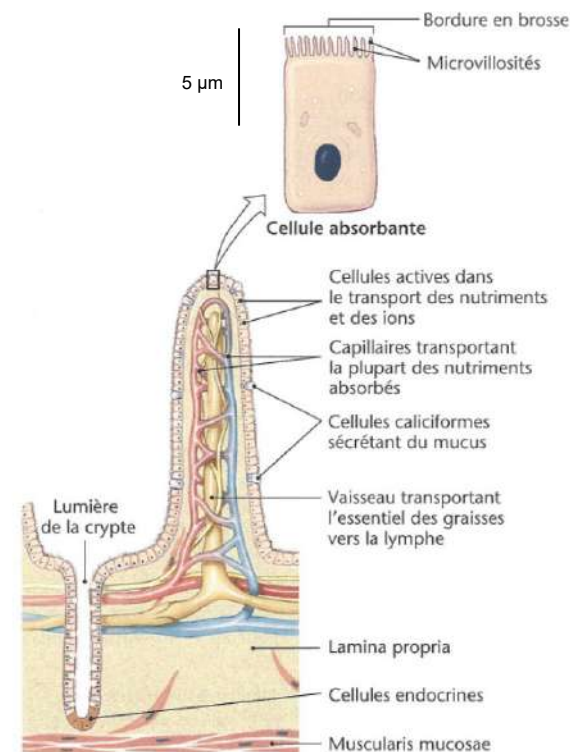
a. L'entérocyte, un type cellulaire majoritaire dans un épithélium au sein d'une muqueuse

α. Un épithélium dans une muqueuse repliée (villosités, cryptes de LIEBERKÜHN) et vascularisée

- On appelle **muqueuse** une limite interne de l'organisme au contact d'une cavité interne (ouverte sur l'extérieur) nommée lumière comprenant un **épithélium** et d'un niveau conjonctif lâche sous-jacent (nommé **chorion** ou **lamina propria**).
- L'intestin étant creusée par la lumière intestinale, il est donc logiquement bordé intérieurement par une **muqueuse** dont l'épithélium s'appelle tout simplement **épithélium intestinal**.
- Cet **épithélium intestinal** se caractérise par (figures 7-8) :
 - Des **villosités intestinales**, replis intestinaux évaginés de la muqueuse multipliant par 30 la surface d'absorption par rapport à une surface lisse.
 - Des **cryptes intestinales** (= **glandes de LIEBERKÜHN**), replis intestinaux invaginés participants à l'absorption et à la production de certaines enzymes.
 - La présence de **capillaires sanguins**, collectant la plupart des nutriments absorbés ainsi que l'eau et les ions, et de **chylifères**, vaisseaux lymphatiques en cul de sac au niveau desquels sont sécrétés les **chylomicrons** (lipoprotéines riches en lipides) par les entérocytes.



▲ FIGURE 7. **Augmentation de la surface de la paroi de l'intestin grâce par trois niveaux de replis.** D'après PÉRILLEUX et al. (2002).
x ... facteur multiplicatif de la surface d'échange dû au repli



▲ FIGURE 8. **Gros plan sur une villosité et une crypte de LIEBERKÜHN.** D'après SILVERTHORN et al. (2007).

β. Un épithélium unistratifié et prismatique, à fonction de revêtement et d'absorption (+ sécrétion)

- L'épithélium intestinal est :
 - Un **tissu épithélial (= épithélium)**, c'est-à-dire un **tissu dont les cellules sont jointives grâce à des jonctions intercellulaires et s'arriment sur une matrice extracellulaire nommée lame basale**.

Structuralement :

- Un **épithélium unistratifié = simple**, c'est-à-dire **composé d'une seule couche de cellules**.

Il peut parfois paraître légèrement **pseudostratifié**, c'est-à-dire donner une **fausse impression de posséder plusieurs couches cellulaires parce que les noyaux ne sont pas forcément tous au même niveau**.

- Un **épithélium prismatique**, c'est-à-dire **dont les cellules sont allongées le long de l'axe vertical**.

Fonctionnellement :

- Un **épithélium de revêtement**, c'est-à-dire **limitant une surface de l'organisme interne ou externe de l'organisme**.
- Un épithélium à fonction d'**absorption**, c'est-à-dire un épithélium de revêtement où d'**importants échanges de matière – surtout vers l'organisme – s'effectuent**.
- Avec une **activité sécrétoire (= libération de substances produites par les cellules à l'extérieur des cellules)** hors absorption, soit **exocrine** (ex. mucus produit par les mucocytes), soit **endocrine** (ex. hormones intestinales, voire facteurs paracrines).



La **définition** d'un épithélium, leur **classification**, etc. ainsi que la **typologie des autres tissus** (notamment les **conjonctifs** au sens large... mais aussi les **tissus musculaires**) doivent être **maîtrisés sur le bout des doigts**.

γ. Un épithélium comprenant des types cellulaires variés

- Dans le détail, cet épithélium comprend un certain nombre de **types cellulaires différents (figures 9-10-11)** :
 - Les **entérocytes** ou **cellules intestinales** qui sont les **cellules absorbant les nutriments au sein de l'épithélium intestinal**. Elles sont **majoritaires** et sécrètent **certaines enzymes de la bordure en brosse**.

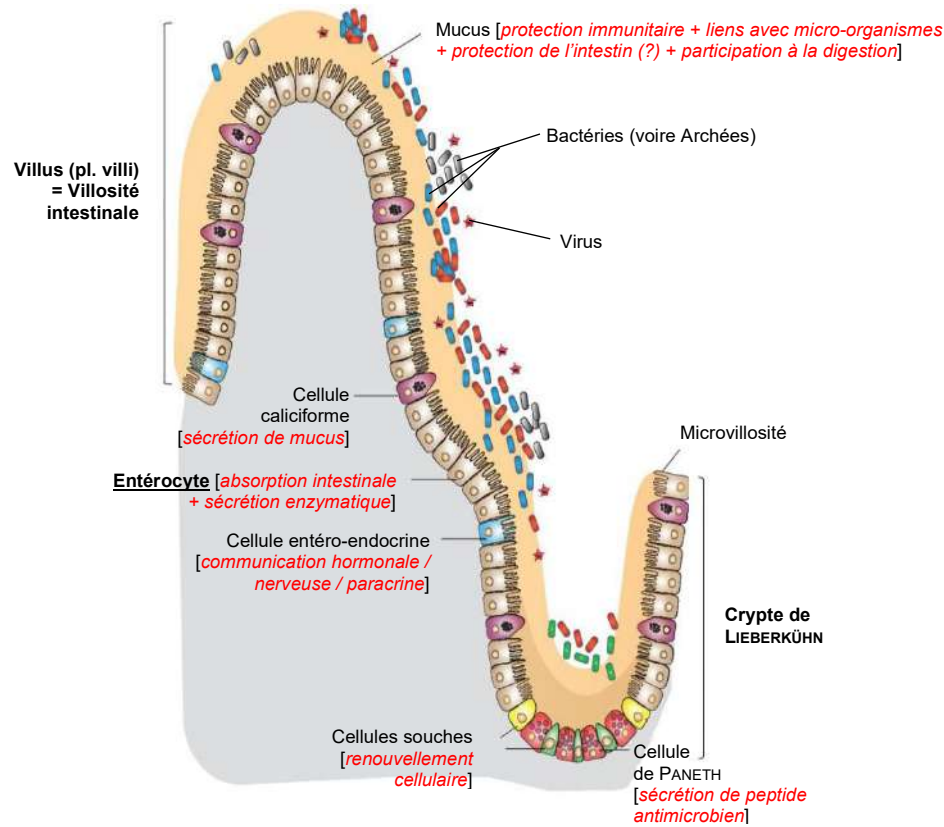
Les **enzymes de la bordure en brosse** sont des **enzymes sécrétées par l'intestin et qui se localisent au niveau des microvillosités, généralement transmembranaires ou au moins ancrées dans la membrane plasmique entérocytaire**.

- Les **cellules caliciformes** ou **cellules à mucus** ou **mucocytes** qui sont les **cellules glandulaires sécrétant un mucus transparent (le mucus intestinal)**. Ce mucus **préservait l'épithélium intestinal de la digestion (mais bon... de plus en plus discuté...)** et **participerait à la digestion / l'absorption et surtout la protection / l'interaction** avec les **agents biologiques** situés dans la lumière.
- Les **cellules souches (= cellules progénitrices) intestinales** qui sont des **cellules dont la division assure le renouvellement des autres types cellulaires**. Elles sont surtout de deux types et plutôt situées au **fond des cryptes**.
- Les **cellules de PANETH**, **cellules situées au fond des cryptes à rôle immunitaire (sécrétion de peptides antimicrobiens)**.
- Les **cellules entéroendocrines**, **cellules produisant des hormones, des neuropeptides et/ou des facteurs paracrines intervenant dans le contrôle surtout local de la digestion et de l'absorption**. Elles occupent des **positionnements variés** et comprennent **une dizaine de types cellulaires** formant le « **système endocrinien entérique** ».

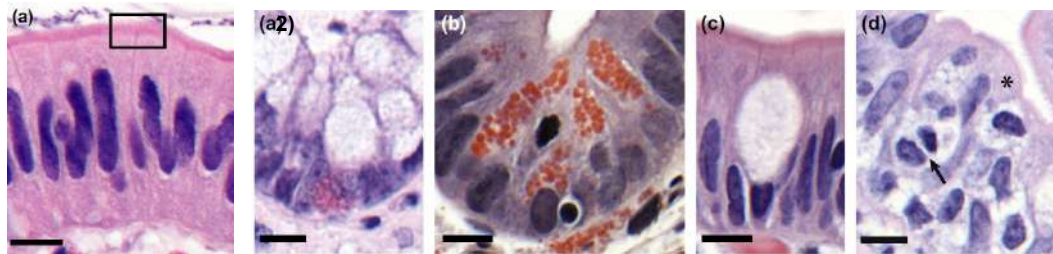


▲ FIGURE 9. **Épithélium intestinal au MET**. D'après PORTER & BONNEVILLE (1973).

(*) interdigitation. **Co** fibres de collagène. **Cp** coupe transversale d'un capillaire. **Cp'** coupe longitudinale d'un capillaire. **F** fibroblaste. **FN** fibres nerveuses. **GM** grains de mucigène (vésicules de mucus). **L** gouttelettes lipidiques. **LB** lame basale. **Lu** lumière intestinale. **Mv** microvillosité. **Ft** feutrage terminal. **M** mitochondrie. **ML** fibres musculaires lisses. **N** noyau.



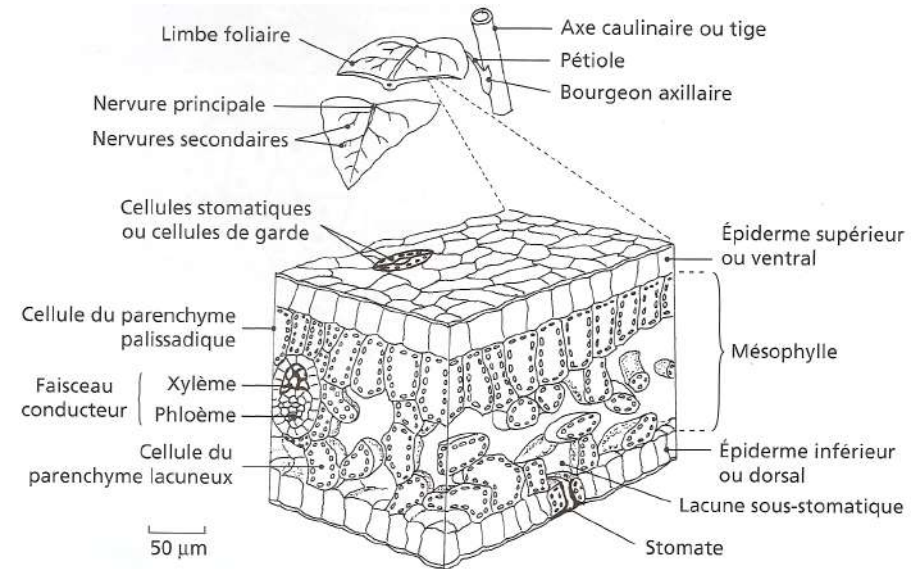
▲ FIGURE 10. **Gros plan sur une villosité et une crypte de LIEBERKÜHN.**
D'après Wikipédia, modifié.



(a) **Entérocytes** (bordure en brosse encadrée). (a2) Cellules entéroendocrines.
(b) Cellules de PANETH (avec granulations colorées). (c) Cellule caliciforme.
(d) Cellule immunitaire (*) et une poche lymphocytaire (*).
Échelle (un peu surestimée ?) 10 µm.

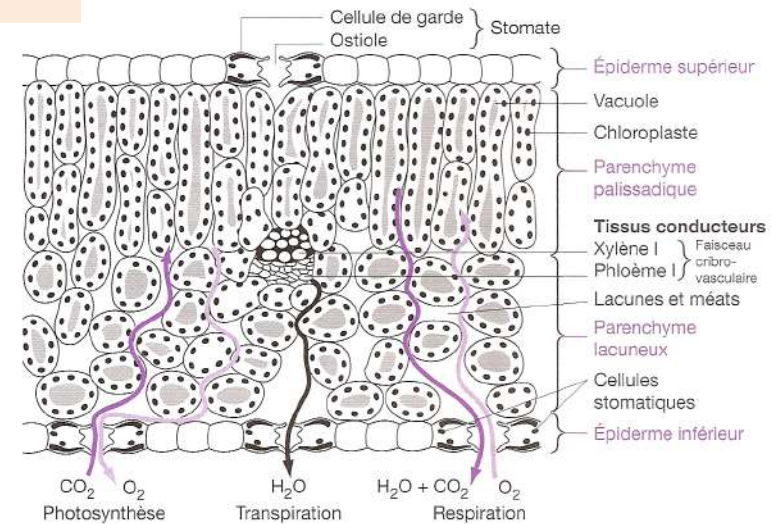
▲ FIGURE 11. **Cellules de l'épithélium intestinal au MO.** D'après EDELBLUM & TURNER (2015).

b. La CPP, cellule constitutive du parenchyme palissadique, partie supérieure du parenchyme assimilateur foliaire à méats étroits



En vrai, chez les dicots, les stomates sur la face supérieure ne sont pas très fréquents.

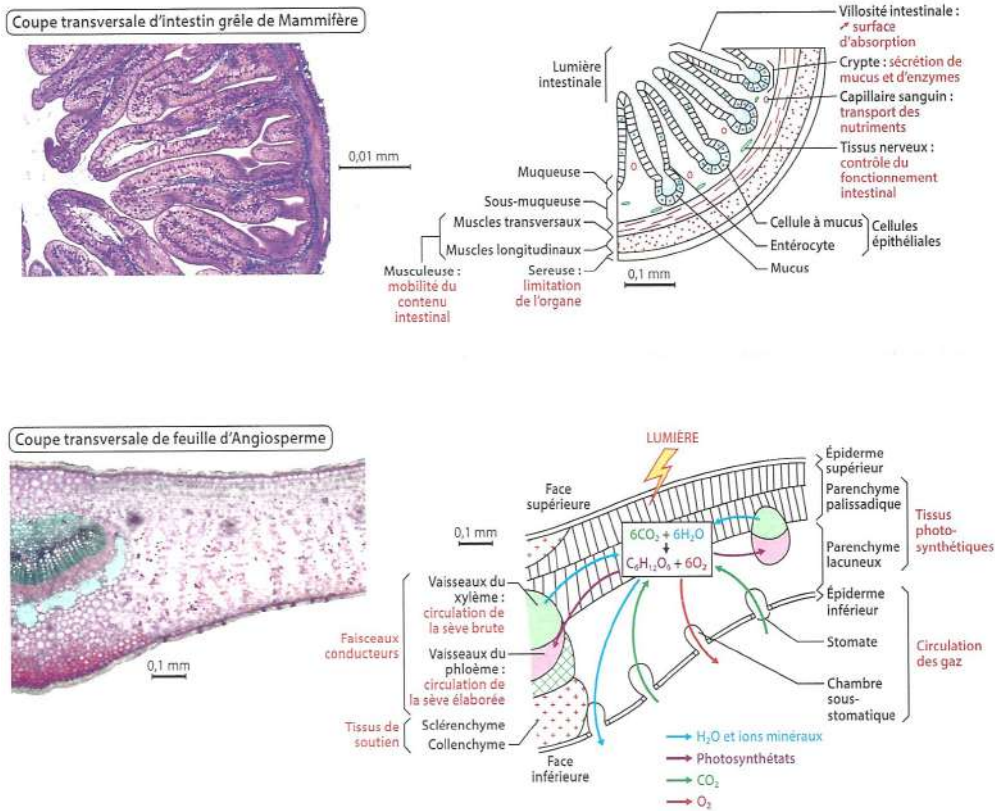
Situation anatomique des cellules du parenchyme palissadique.



▲ FIGURE 12. **Situation anatomique du parenchyme foliaire palissadique au travers de coupes transversales de feuilles : deux schématisations.** D'après PEYCRU *et al.* (2010a) et BREUIL (2007).

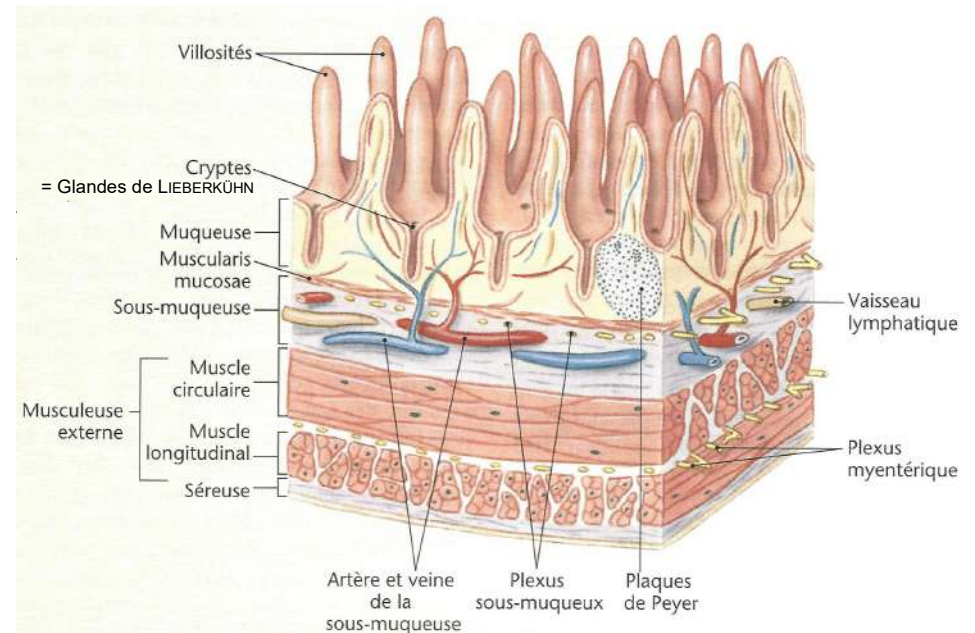
- La **CPP** fait partie du **parenchyme chlorophyllien foliaire palissadique** (figure 6 page 6 + figure 12) soit :
 - Un **parenchyme**, donc un **tissu végétal de remplissage**.
 - Un **parenchyme assimilateur** = **parenchyme chlorophyllien** = **chlorenchyme**, **parenchyme riche en chloroplastes à fonction photosynthétique**.
 - Un **mésophylle**, **parenchyme assimilateur foliaire**.
 - Un **mésophylle hétérogène**, **parenchyme assimilateur foliaire constitué de deux parties – parenchyme palissadique, à petits métabolismes intercellulaires, et parenchyme lacuneux, à grandes lacunes aérifères entre les cellules – typique des ‘dicotylédones’**.
 - Un **parenchyme palissadique**, **partie à petits métabolismes intercellulaires du mésophylle hétérogène de ‘dicots’**.

3. Des tissus insérés dans des organes, ensembles de tissus coopérant localement dans la réalisation d'une ou plusieurs fonctions



▲ FIGURE 13. Des tissus dans des organes. D'après DAUTEL et al. (2021)

a. L'entérocyte : une cellule animale insérée dans l'intestin grêle de Mammifères



▲ FIGURE 14. Organisation la paroi de l'intestin grêle. D'après SILVERTHORN et al. (2007).

- L'**intestin grêle** (figures 13-14) est un **long conduit** (d'environ **46 m** chez la Vache, pour un diamètre de **5 cm**) aux multiples replis qui assure la digestion et l'absorption de nombreux nutriments ainsi que l'avancée des aliments.
- Il est divisé en **trois segments** (de l'amont vers l'aval) : le **duodénum**, le **jéjunum** et l'**iléon**.

L'intestin grêle : particularités histologiques de la paroi et principales relations structure-fonction [pour information ?]

Voir figure 13

MUQUEUSE (épithélium intestinal + chorion)

La muqueuse et la sous-muqueuse forment de nombreux replis circulaires qu'on appelle **valvules conniventes** (ou **valvules de KERCKRING**). La muqueuse est de plus **repliée à un niveau supplémentaire plus fin**, ce qui forme des **villosités**. Et, au sein de l'**épithélium**, les **entérocytes** présentent eux-mêmes des **replis microscopiques du côté de la lumière** qu'on appelle **microvillosités**. On appelle **bordure en brosse** cette **ornementation en microvillosités des membranes d'entérocytes**.

>>> Très importante surface d'échange (env. 200-250 m² chez l'homme = taille d'un terrain de tennis si on dépliait et si on étalait complètement cette surface).

- Épithélium unistratifié prismatique majoritairement constitué de cellules absorbantes** ou **entérocytes**, mais comprenant aussi des **cellules exocrines** (notamment des **cellules à mucus** qu'on peut appeler **cellules calciformes**) et **endocrines** (voire **paracrines**) d'apparence **plus cubique**, particulièrement **concentrées au fond des cryptes** ou **glandes de LIEBERKÜHN** (**glandes intestinales**). Les sécrétions exocrines comprennent du **mucus intestinal** qui **aurait surtout un rôle immunitaire** (en limitant l'adhésion des micro-organismes sur la paroi intestinale) et

quelques **enzymes** soit **sécrétées dans la lumière**, soit le plus souvent **exprimées à la surface des cellules (au niveau de la membrane des microvillosités)**.

(On parle parfois de « **suc intestinal** » pour désigner les **sécrétions intestinales exocrines**).

▪ **Lamina propria** riche en **finis vaisseaux sanguins** favorisant les échanges et notamment l'absorption ; présence aussi de **chylifères** (= **capillaires lymphatiques situés dans les villosités de l'intestin grêle**).

▪ **Muscularis mucosae** (favorise l'évacuation des **sécrétions exocrines** jusqu'à la lumière).

SOUS-MUQUEUSE (conjonctif lâche)

▪ Dans le **duodénum** (surtout dans la **partie proximale** proche du **pylore**), la sous-muqueuse comprend des **glandes de BRUNNER** qui sont des **glandes acineuse (ou acino-tubuleuses) produisant un liquide aqueux riche en ions hydrogénocarbonates HCO_3^- qui neutralise l'acidité de l'estomac et favorise l'établissement d'un pH proche de 7-8** (ce liquide est appelé le [ou la] **mucoïde alcalin[e]**).

Dans le **reste de l'intestin**, ces **glandes** sont **rare** voire **absentes**. La sous-muqueuse ne présente alors **rien de particulier**, si ce n'est son implication dans les **valvules conniventes**.

MUSCULEUSE (tissu musculaire lisse)

▪ Couche assurant le **péristaltisme** et la **segmentation** du chyme.

SÉREUSE

▪ Tissu conjonctif + **mésothélium**.

Notons que des **nerfs** (parfois rassemblés en réseau nommé **plexus**) et des **cellules immunitaires** (comme celles des **plaques de PEYER**) parsèment ces tissus.

• Trois niveaux de repliement sont à noter (revoir **figure 7 page 7**) :

- La **muqueuse** et la **sous-muqueuse** forment de nombreux **replis circulaires** qu'on appelle **valvules conniventes** (ou **valvules de KERCKRING**) (**figures 15-16**).
- La muqueuse est de plus **repliée à un niveau supplémentaire plus fin**, ce qui forme des **villosités**.
- Et, au sein de l'épithélium, les **entérocytes** présentent eux-mêmes des **replis microscopiques du côté de la lumière** qu'on appelle **microvillosités**. On appelle **bordure en brosse** cette **ornementation en microvillosités des membranes d'entérocytes**.

b. La cellule du parenchyme palissadique : une cellule végétale insérée dans la feuille des Angiospermes 'dicotylédones'

- La **feuille** est un **organe végétal aplati dont la fonction principale est de capter de la lumière et de réaliser la photosynthèse**. Une coupe transversale de feuille révèle (de haut en bas) des **tissus** qui **coopèrent** (**figures 12-13**) :
 - Une **cuticule supérieure**, la cuticule étant un **revêtement cireux imperméable essentiellement constitué de cutines**.
 - Un **épiderme supérieur** ou **ventral** : **cellules non chlorophylliennes, tissu de revêtement** (on trouve parfois des **stomates**, mais ceux-ci sont plutôt en face dorsale).
 - Un **parenchyme chlorophyllien palissadique** : un **parenchyme** est un **tissu de remplissage**. Celui-ci est **chlorophyllien** et à **fonction photosynthétique** ; on peut donc l'appeler **chlorenchyme**. Il est dit **palissadique** car les cellules sont **étroitement associées dans une organisation en « palissade »**. De l'air et de l'eau peuvent être trouvés dans les **méats aérifères**.
 - Un **parenchyme chlorophyllien lacuneux** où, à la différence du parenchyme palissadique, les cellules (chlorophylliennes : c'est aussi un **chlorenchyme**) ont une **forme moins géométrique et où des lacunes aérifères les éloignent**, permettant la **circulation de gaz** et l'évaporation d'eau.

Le **parenchyme palissadique** et le **parenchyme lacuneux** forment le **mésophylle** ; on dit que ce **mésophylle** est **hétérogène**, ce qui est caractéristique des **Eudicotylédones**. Chez les **Monocotylédones**, le parenchyme est **homogène** (on trouve alors un seul type de parenchyme).

- Un **épiderme inférieur** ou **dorsal** : cet épiderme présente un **nombre plus ou moins élevé de stomates (deux cellules de gardes = deux cellules stomatiques, riches en chloroplastes et qui peuvent ouvrir ou fermer un orifice, l'ostiole, par lequel s'effectuent les échanges gazeux et l'évaporation d'eau – notion de transpiration foliaire)**.
- Une **cuticule inférieure**.

• On trouve aussi des **tissus conducteurs**, permettant les **corrélations trophiques** (= **coopération dans l'acheminement des nutriments entre des parties n'ayant pas la même spécialisation** comme les **organes sources*** et les **organes puits***) :

- Le **xylème** : il assure la **circulation ascendante de la sève brute qui achemine vers tous les organes de l'eau et des ions minéraux (voire des acides aminés) depuis les racines**.
- Le **phloème** : il **assure notamment la circulation de la sève élaborée qui achemine les photoassimilats des organes sources vers les organes non photosynthétiques**.

Rappelons qu'une **feuille** comprend typiquement un **limbe**, un **pétiole** et un **bourgeon axillaire** (revoir le **cours sur la Fabacée**).

- Les **cellules du parenchyme palissadique** effectuent de **nombreuses synthèses à partir d'éléments minéraux reçus des faisceaux vasculaires, de CO_2 , d'eau et de lumière** ; les **photosynthétats** (= **produits de la photosynthèse**) sont ensuite soit utilisés par la feuille, soit utilisés par d'autres parties de la plante (**organes-puits**) après transport dans la **sève élaborée**.

Les **particularités structurales de la feuille** ont déjà été vues **plus haut**.

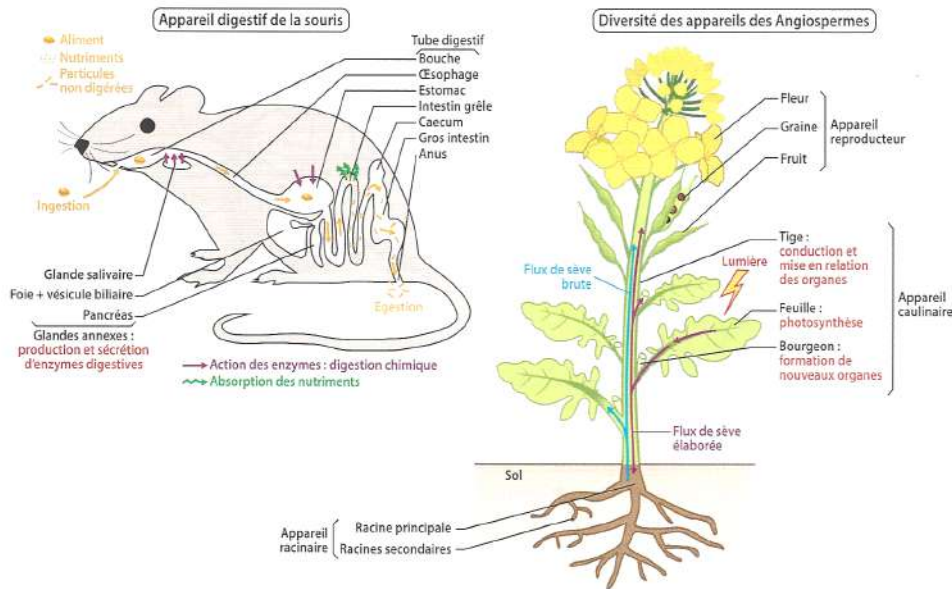
*On peut distinguer chez les 'plantes' terrestres :

- Les **organes sources** : ce sont les **organes qui réalisent la photosynthèse et assurent l'autotrophie de la plante**. Il s'agit de l'appareil végétatif aérien, avec au premier rang les **feuilles**.
- Les **organes puits** : ce sont les **parties hétérotrophes de la plante qui bénéficient de matière organique produite par d'autres organes**.

Voir **chapitres sur le métabolisme + chapitre 2 sur les Fabacées + chapitre 4 abordant la circulation végétale**

- **Autotrophie** : désigne la **capacité, pour un organisme vivant, de produire de la matière organique à partir de matière minérale**. On peut distinguer l'**autotrophie au carbone** (incorporation de carbone inorganique, souvent issu du CO_2 , dans la matière vivante) ou l'**autotrophie à l'azote** (incorporation d'azote minéral – nitrates, diazote atmosphérique... – à la matière vivante).
- **Hétérotrophie** : désigne l'**incapacité, pour un organisme vivant, de produire de la matière organique sans matière organique pré-existante issue d'un prélèvement dans l'environnement**.

4. Des organes s'intégrant dans des systèmes ou appareils, s'intégrant eux-mêmes dans des organismes



▲ FIGURE 15. Les organes au sein des appareils. D'après DAUTEL et al. (2021)

Appareil et système : nuance ou équivalence ?

Les notions d'**appareil** ou **système** :

- Différent entre **Animaux** et '**végétaux**'

▪ Chez les **Animaux**, il s'agit d'un **ensemble d'organes coopérant dans la réalisation d'une grande fonction dans l'organisme**. Exemples : appareil digestif, appareil respiratoire, système immunitaire...

▪ Chez les '**plantes**', il s'agit d'un **ensemble d'organes correspondant à une zone particulière de la plante (éventuellement en lien avec un ensemble de fonctions)**.

Typologies structurales : appareil aérien vs. appareil souterrain, appareil caulinaire vs. appareil racinaire

Typologie fonctionnelle : appareil végétatif vs. appareil reproducteur

- Différent parfois entre les deux auteurs chez les Animaux :

▪ Pour les **auteurs français classiques**, un **appareil** désigne un **ensemble d'organes bien individualisés et formant un continuum** [exemples : appareil digestif, appareil respiratoire, appareil urinaire, appareil reproducteur...] alors qu'un **système** désigne plutôt un **ensemble diffus et/ou déconnecté d'organes voire de cellules** [exemples : système nerveux, système endocrinien, système immunitaire...].

Problèmes :

* si l'on prend le **système nerveux**, on peut bien suivre un **continuum des nerfs** et terminaisons nerveuses jusque dans les **organes**...

* si l'on prend le **système circulatoire** ou **appareil circulatoire** selon les cas, c'est tout autant un **continuum** que le système nerveux et tout aussi **diffus dans tous les organes** que le système nerveux aussi (même si les **capillaires** sont bien limités)... alors **appareil ? système ?**

>> on voit que cette **dichotomie a priori** séduisante arrive vite à ses limites.

- Pour les **auteurs italiens**, la différence réside dans l'**origine embryologique** des cellules : l'**appareil** comprend des **organes issus de mêmes tissus embryonnaires** alors que le **système** comprend des **organes d'origines embryonnaires variées**... rien à voir avec les Français donc !
- Pour les **auteurs espagnols**, c'est souvent le **contraire des Italiens**, avec parfois des auteurs reprenant la **vision des Français**...
- Pour les **auteurs anglo-saxons** (qui donnent aujourd'hui le **la** de la littérature scientifique) et les **auteurs modernes** de tous pays, le terme « **apparatus** » a **quasiment disparu** et il n'est question que de **système**... **tendance simplificatrice** qui tend à s'imposer partout petit à petit et qui est souvent celle que je suis.

a. L'intestin grêle, organe de l'appareil digestif présent chez un Mammifère

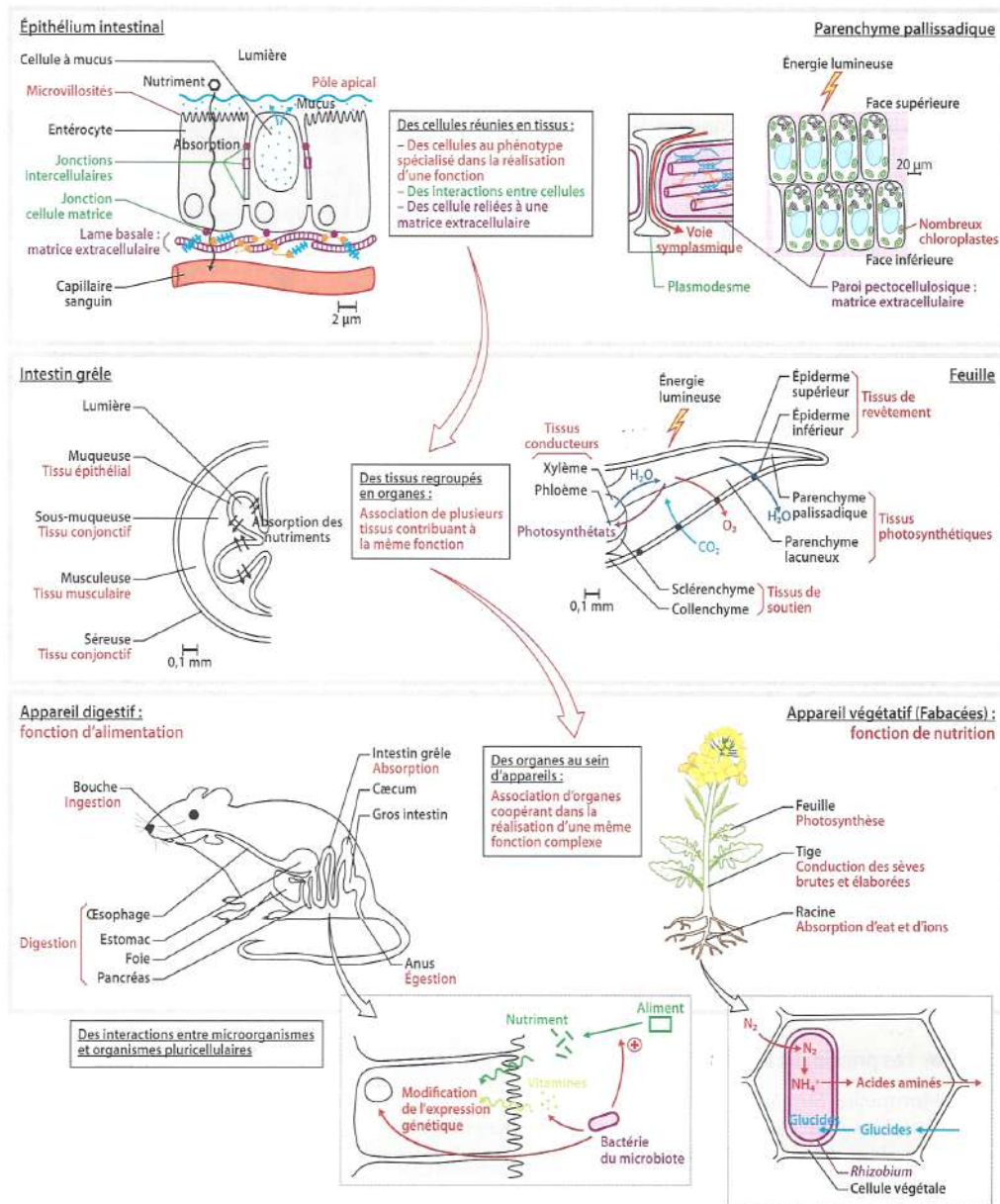
- L'intestin grêle s'intègre dans l'**appareil digestif**, **ensemble d'organes assurant la prise alimentaire, la digestion au sens strict (simplification des aliments en nutriments organiques) et l'absorption des nutriments par le milieu intérieur** (figure 15). Au sein, de l'appareil digestif, il s'agit du **plus long conduit du tube digestif**, **ensemble continu d'organes creux où circulent les aliments dans l'organisme**.

b. La feuille, organe de l'appareil végétatif aérien présent chez une Angiosperme

- Selon la typologie retenue, on peut classer la **feuille** :
 - Dans l'**appareil aérien**, **ensemble des organes situés hors du sol**.
 - Dans l'**appareil caulinaire**, **ensemble formé par la tige et les organes qu'elle porte**.
 - Dans l'**appareil végétatif**, **ensemble des organes non impliqués dans les fonctions de reproduction sexuée**.

5. Bilan

- Voir **figure 16** (quelques points seront précisés plus loin).



▲ **FIGURE 15. Les cellules dans les différentes échelles biologiques.**

D'après DAUTEL *et al.* (2021)

6. Discussion : la possibilité d'une pluricellularité chez certains procaryotes ?

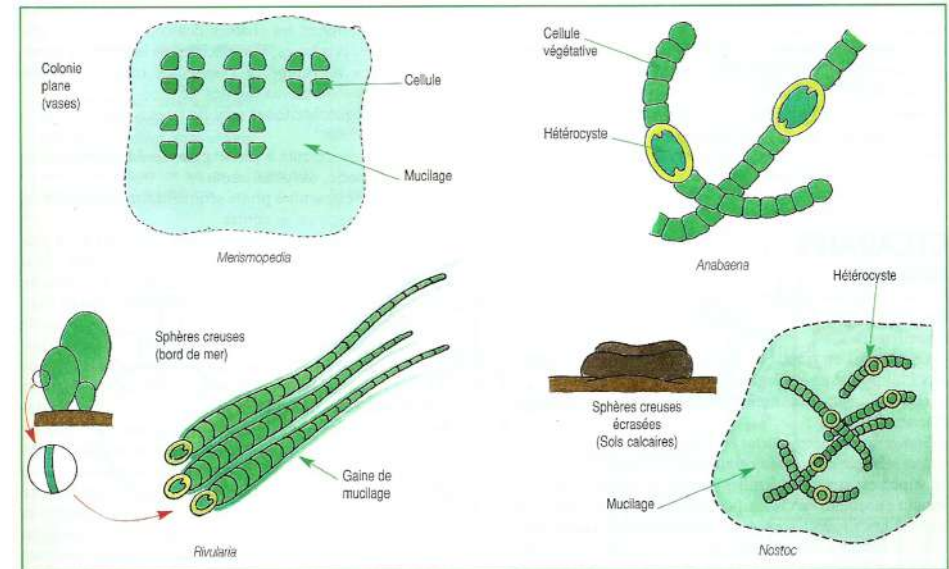


Fig. 1 : Différents types de Cyanobactéries.

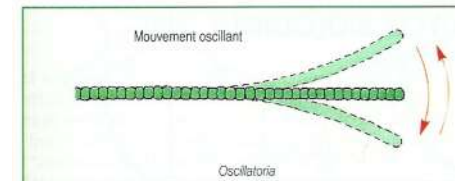


Fig. 2 : Mouvement oscillant.

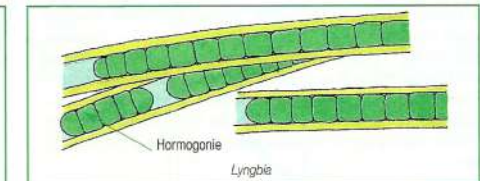


Fig. 3 : Hormogonie.

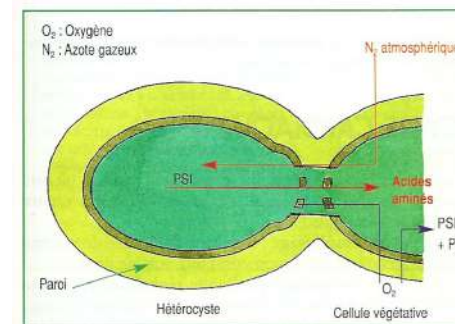


Fig. 4 : Fonctionnement des hétérocystes.

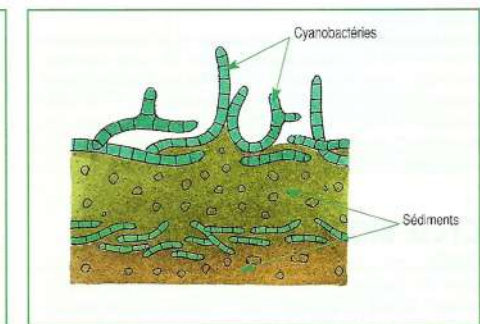


Fig. 5 : Structure d'une lamine de stromatolite.

▲ **FIGURE 16. Les Cyanobactéries.** D'après MORÈRE, PUJOL *et al.* (2007).

- Y aurait-il de la **pluricellularité** chez les **procaryotes** ? Certes, les **Bactéries** forment des **colonies monospécifiques**, des **biofilms polyspécifiques**... mais des **organismes pluricellulaires véritables** (revoir la **tentative de définition** dans l'**encadré A**) ?
- Prenons l'exemple des **Cyanobactéries** (figure 16), **Bactéries photosynthétiques** qui vivent **souvent en colonies de cellules** regroupées dans un **même mucilage (gel polysaccharidique et protéique se gonflant d'eau)** et peuvent présenter, chez **certaines espèces** :
 - Une **coopération nutritionnelle entre cellules**.
 - Une **différenciation de cellules au sein des colonies**.
 (!) Il s'agit là de **marqueurs de pluricellularité (encadré A)**.

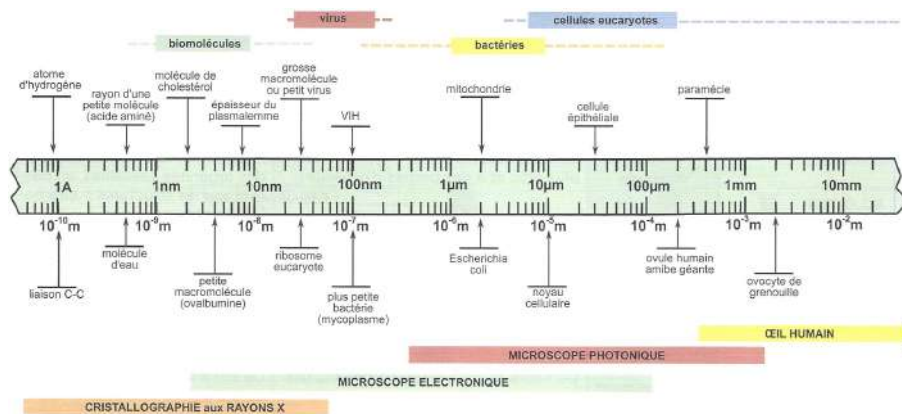
- Chez bien des taxons, par exemple **Nostoc sp.**, on trouve des **hétérocystes, cellules spécialisées qui réalisent la fixation de diazote atmosphérique et fournissent des acides aminés à la colonie**, et des **cellules végétatives qui réalisent la photosynthèse et fournissent des composés carbonés aux hétérocystes** (figure 16-4) Les **Cyanobactéries** sont ainsi **autotrophes au C et à l'N**. Il y a donc **coopération** et **spécialisation fonctionnelles (différenciation)** des cellules.
- Nombre de **Cyanobactéries** sont en outre capables de produire des **cellules spécialisées** dans la **dispersion de l'organisme** ou sa **résistance aux conditions défavorables**.
- Enfin, sans posséder de flagelles, la **colonie** de certaines espèces peut **coopérer** dans la réalisation d'un **mouvement oscillant** sans que tous les mécanismes soient parfaitement compris (mais un **rôle de l'osmose** semble probable).

C. La connaissance des cellules et des tissus permise par des techniques d'observation microscopique

- Vous devez **maîtriser les méthodes d'étude des cellules** développées dans la **fiche technique accompagnant le TP C**, sans oublier la **diversité des colorations**.
- Un résumé des méthodes importantes est proposé dans le **tableau I**. Ce n'est néanmoins **pas complet ni illustré**... rien ne remplace le **travail de la fiche technique** !
- On n'oublie de connaître l'**ordre de grandeur** des principaux **objets biologiques** et la **résolution des principales techniques d'observation** (figure 17).

▼ TABLEAU I. **Techniques d'observation microscopiques**. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

	Microscopie photonique		Microscopie électronique	
	Sur fond blanc	À épifluorescence	À transmission	À balayage
Objets observés	Elle permet d'observer à la structure des tissus et des cellules, à l'organisation des cellules et des organites les plus gros et à des parties d'organites.		Elle donne accès à l'ultrastructure cellulaire, comprise entre le niveau moléculaire et le niveau des organites cellulaires, en passant par les structures supramoléculaires.	
Principe de la technique	Elle s'appuie sur les propriétés d'absorbance et de transmission et réémission des radiations par les structures observées.		Les objets observés sont préparés pour être traversés ou pour réfléchir des électrons focalisés par les lentilles électromagnétiques.	
Grossissement	De x40 à x1 000, résolution de 0,2 µm.		De x10 à x2 000 000, résolution de 0,2 µm à 0,1 nm.	
Coupe	Amélioration par immersion. Épaisseur d'environ 5 µm.		Épaisseur entre 50 et 100 nm.	
Préparation de l'objet	Montage frais Montage avec coloration vitale ou non vitale.	Incorporation de fluorophores (molécules qui émettent des rayonnements fluorescents suite à une excitation par des radiations spécifiques) au sein d'une molécule, d'une membrane, d'un compartiment.	Traitement au tétra-oxyde d'osmium ou avec des métaux lourds.	Réplique composée de métaux lourds obtenue selon un angle d'ombrage.
Traitement	Éclairage par la lumière blanche et radiations transmises.	Éclairage par des UV et fluorescence réémise.	Traversé par un faisceau d'électrons.	Réfléchi un double faisceau d'électrons.
Image obtenue	Image contrastée par transparence sur fond blanc.	Image fluorescente des structures d'intérêt au sein de leur environnement.	Image en noir et blanc ou traitée en fausses couleurs.	Image en nuance de gris donnant du relief aux objets intracellulaires et moléculaires.



▲ FIGURE 17. **Échelle des objets biologique et méthode d'observation / d'étude adaptée**. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).

II. Une cohésion des tissus assurée par la matrice extracellulaire et/ou des jonctions cellulaires

- La **cohésion des tissus** désigne *l'ensemble des moyens assurant la cohérence et la permanence structurales des tissus*. Sont impliqués les **matrices extracellulaires** et, dans de nombreux **tissus animaux**, des **jonctions cellulaires**.

Capacités exigibles

- ✓ **Identifier** les principaux types de jonctions intercellulaires sur des clichés de microscopie électronique.
- ✓ **Schématiser** l'organisation moléculaire en réseau des matrices extracellulaires animales d'un tissu conjonctif et d'un tissu épithélial et celle d'une paroi pectocellulosique).

A. Les jonctions cellulaires, des édifices protéiques associant certaines cellules animales entre elles (ou à la matrice extracellulaire)

1. La cohésion tissulaire, une coopération cytosquelette – jonctions – matrice dans certains tissus animaux, notamment les tissus épithéliaux

- La **cohésion des tissus** suppose des **liens mécaniques entre cellules en même temps que la forme des cellules est assurée**. On devine alors une **coopération fonctionnelle** entre :
 - Des **jonctions cellulaires** : **complexes protéiques impliquant des protéines transmembranaires et permettant d'associer deux cellules adjacentes entre elles**. On y inclut souvent, par extension, les **jonctions cellule-matrice** qui assurent **l'ancrage de la membrane plasmique sur la matrice extracellulaire**. Les **jonctions** sont plutôt spécifiques* des **cellules animales**.

* On peut débattre de savoir si les **plasmodesmes** constituent ou non des **jonctions** dans les cellules végétales.

Les **jonctions entre cellules** sont **typiques des tissus épithéliaux** (figures 18-19, tableau II) puisque ceux-ci sont constitués de **cellules jointives**. On en trouve aussi dans les **tissus musculaires** et, selon une organisation parfois un peu différente, entre **certaines cellules nerveuses** ou entre **neurones et cellules post-synaptiques**.

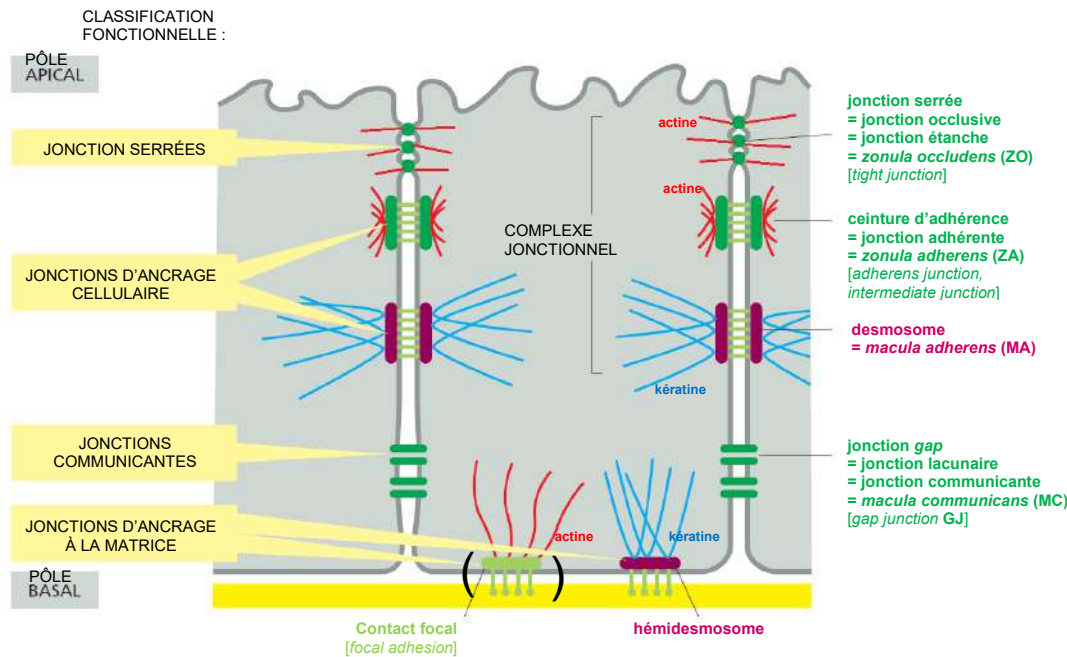
Dans les **tissus conjonctifs**, en revanche, on ne trouve **pas** (ou **extrêmement rarement**) de **jonctions cellule-cellule** mais les **jonctions cellule-matrice** sont importantes et à l'origine de la mise en cohésion des cellules par la matrice.

- Le **cytosquelette** : **ensemble de protéines constituant un réseau fibreux cytosolique conférant sa forme aux cellules (en tout cas dans les cellules animales) et impliqué dans les processus de motilité cellulaire**.
- La **matrice extracellulaire** : **gel hydraté situé autour des cellules de nombreux tissus et composé notamment de polymères glucidiques et de protéines**.

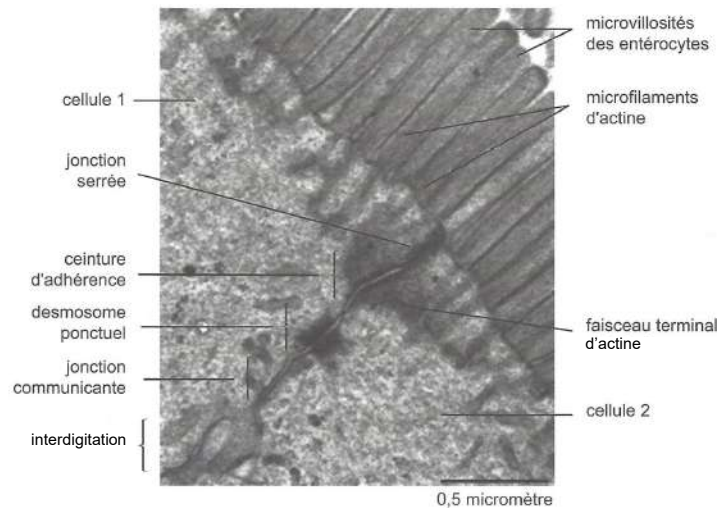
Dans les cellules végétales, la **paroi** assure en outre à la fois le **maintien de la forme cellulaire (rôle squelettique)** et la **cohésion tissulaire**.

Bilan (adapté du programme)

- ✓ L'état pluricellulaire peut être décrit à **différentes échelles** : **tissu, organe, appareil et individu**.
- ✓ Différentes **techniques de microscopie** (optique, à épifluorescence et électronique – MEB et MET) permettent d'étudier l'**organisation des cellules** et des **tissus**.



▲ FIGURE 18. Les principales jonctions dans un entérocyte.
D'après ALBERTS *et al.* (2015), traduit / modifié / adapté.
(!) Notez la **répartition polarisée** des jonctions.



▲ FIGURE 19. Jonctions visibles au MET entre deux entérocytes adjacents.
D'après PEYCRU *et al.* (2013), modifié.

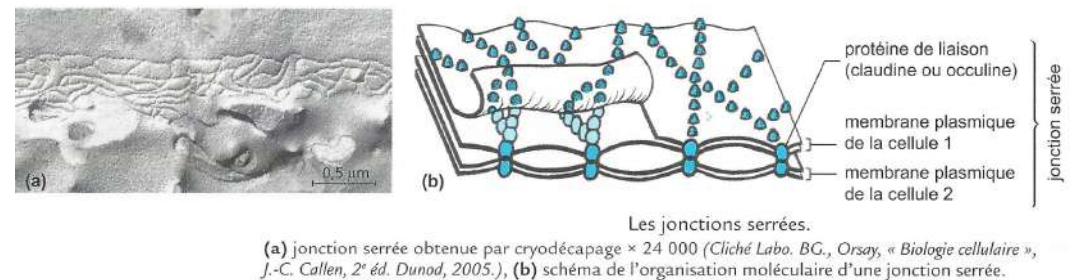
▼ TABLEAU II. Quelques constituants des jonctions. D'après PEYCRU *et al.* (2010a).

Jonctions	Protéines transmembranaires	Ligand extracellulaire	Liaison au cytosquelette	Protéines de liaison au cytosquelette
Ceinture d'adhérence cellule-cellule	Cadhérine	Cadhérine de la cellule voisine	Microfilaments (actine)	Caténines α et β , vinculine...
Desmosome	Cadhérine particulière (desmoglérine)	Cadhérine de la cellule voisine (desmoglérine)	Filaments intermédiaires	Desmoplakine,...
Adhèrence cellule-matrice	Intégrine	Protéines de la MEC (collagène, fibronectine.)	Microfilaments (actine)	Taline, vinculine, α -actinine
Hémidesmosome	Intégrine	Protéines de la MEC (collagène, fibronectine.)	Filaments intermédiaires	—

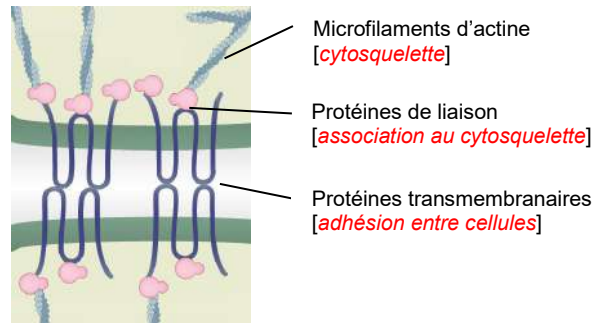
2. Les principales jonctions cellule-cellule d'un tissu épithélial

a. Les jonctions serrées, des jonctions limitant les flux paracellulaires

- Les **jonctions serrées** = **étanches** = **occlusives** (*tight junctions*, *zonula occludens*) (figures 20-21) sont **spécifiques des épithéliums** : ce sont des **complexes protéiques formés de protéines variées qui limitent le flux paracellulaire**.
Le **flux paracellulaire** n'est **pas supprimé**, contrairement aux **conceptions anciennes** ; certaines **jonctions étanches** comprennent même des **pores sélectifs** voire **peuvent se réorganiser et s'ouvrir ou se fermer** en fonction des **conditions physiologiques**.
- En termes d'organisation, les modèles les plus anciens montrent une coopération de **protéines transmembranaires coexprimées par les membranes en contact** de deux types : les **claudines** et les **occludines**... mais on connaît désormais **plus de 40 protéines impliquées** dans les **jonctions étanches** !
- On sait aussi désormais également que des **filaments d'actine** (voire, dans de rares cas, des **microtubules** !) viennent s'ancrer sur les protéines transmembranaires, en association avec des **protéines de liaison**.



▲ FIGURE 20. Jonctions étanches : une électronographie et un modèle historiquement simple.
D'après PEYCRU *et al.* (2013)



▲ FIGURE 21. **Jonctions serrées : un modèle plus récent mais restant très simple.**
D'après MBINFO, simplifié (<https://www.mechanobio.info/what-is-mechanotransduction/what-are-cell-cell-adhesions/what-are-tight-junctions/>), consultation décembre 2021.

b. Les jonctions d'ancrage (anchoring junctions), des jonctions s'associant fermement au cytosquelette et arrimant les cellules entre elles par des cadhérines

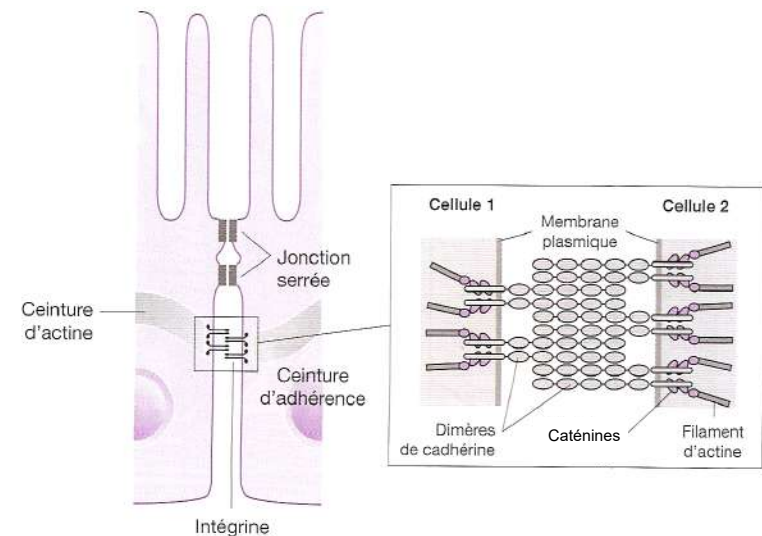
- Ces **jonctions** sont très **résistantes** grâce :
 - À un **lien étroit avec le cytosquelette** (réseau dense d'actine dans le cas de la ceinture d'adhérence ; filaments intermédiaires dans le cas du desmosome)
 - À une **adhésion forte entre cellules** par des **glycoprotéines dimérisées et chargées négativement dans le milieu extracellulaire qui se complexent avec des ions Ca^{2+}** , les **cadhérines**.

a. En lien avec une dense ceinture de microfilaments d'actine : les ceintures d'adhérence (jonctions adhérentes)

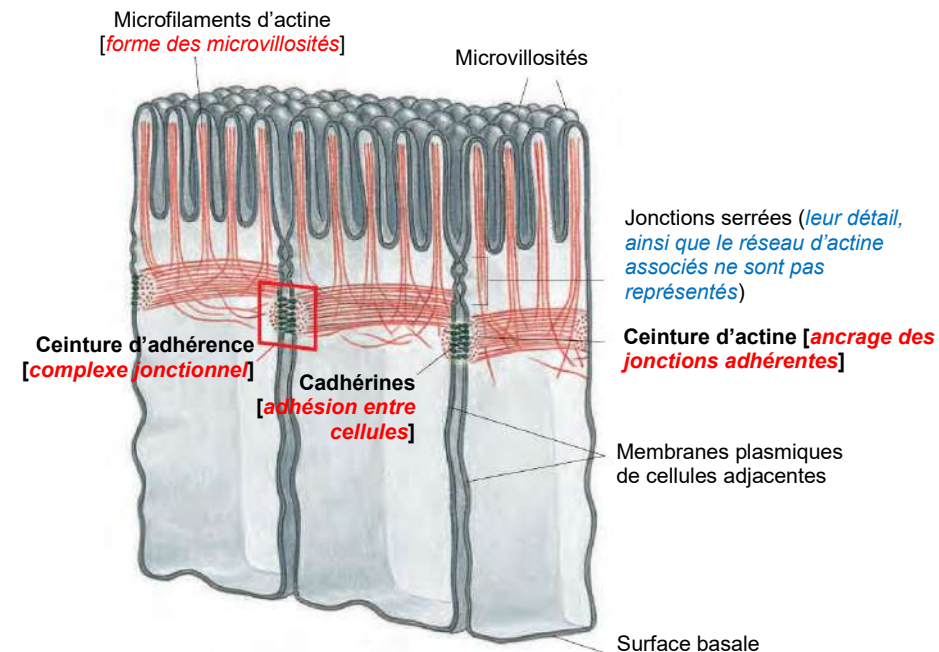
- Les **ceintures d'adhérences** = **jonctions adhérentes** (*adherens junction*, *zonula adherens*) (figures 22-24) sont des **complexes protéiques qui permettent d'accrocher fermement des cellules entre elles par des cadhérines (jonctions d'ancrage) en étant reliés intérieurement à des microfilaments d'actine qui se répartissent de manière circulaire autour de la cellule, constituant une ceinture d'actine**.
- Dans le cytosol, des **protéines de liaisons** (caténines) associent les **dimères de cadhérine** avec l'actine.

β. En lien avec des filaments intermédiaires (typiquement de kératine) : les desmosomes

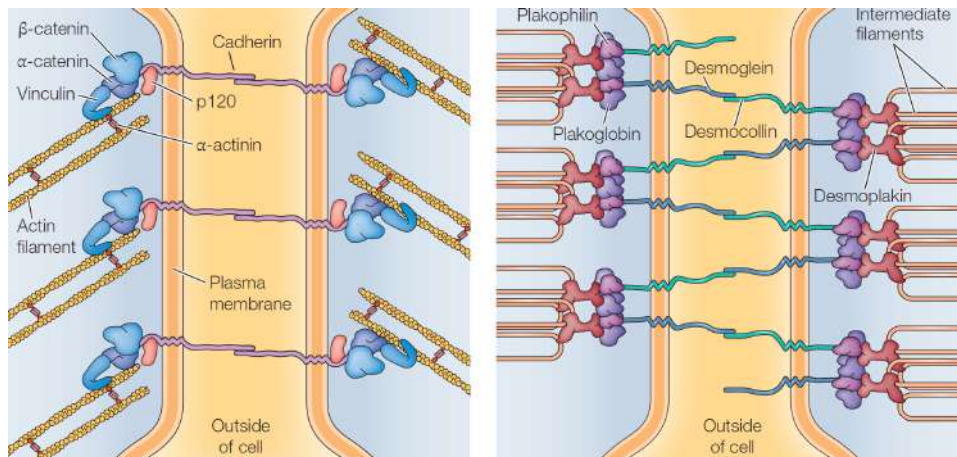
- Les **desmosomes** (*macula adherens*) (figures 24-25) sont des **complexes protéiques qui permettent d'accrocher fermement des cellules entre elles par des cadhérines (jonctions d'ancrage) en étant reliés intérieurement à des filaments intermédiaires qui s'ancrent sur une plaque cytoplasmique (plaque d'ancrage)**.
- Dans les **épithélia**, les **filaments intermédiaires** en question sont des **kératines cellulaires (cytokératines)**.
- Notons que les **cadhérines desmosomales** (desmoglénines, desmocollines) sont **différentes des cadhérines des ceintures d'adhérence**.
- La **plaque cytoplasmique** comprend notamment des **desmoplakines** (ainsi que des **plakoglobines** et des **plakophilines**).



▲ FIGURE 22. **Ceintures d'adhérence.** D'après BREUIL (2007).



▲ FIGURE 23. **Localisation et visualisation en 3D des ceintures d'adhérence dans les entérocytes.** D'après ALBERTS et al. (2015), traduit / adapté.

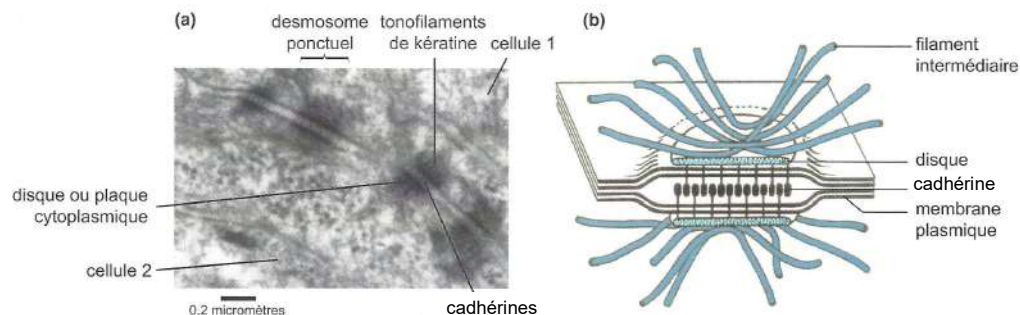


Jonction adhérente

Desmosome

▲ FIGURE 24. **Comparaison du réseau moléculaire des jonctions adhérentes et des desmosomes (modèles simplifiés).** D'après COOPER (2019)

(!) Les **cadhérines** sont, en réalité, **dimérisées**.



Les desmosomes.

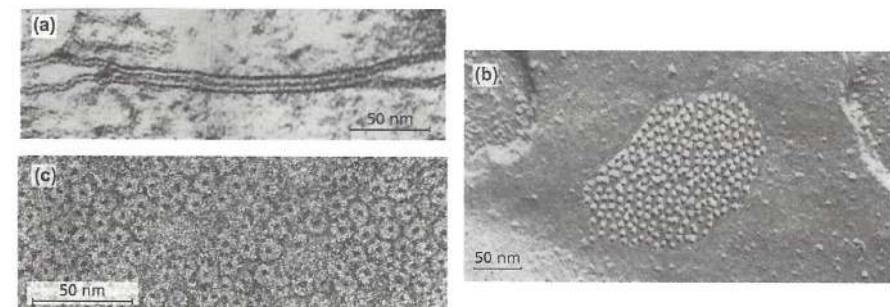
(a) desmosomes punctuels de cellules de la peau humaine $\times 60\,000$ (Cliché N. Benmeradi, IBCG, Toulouse), (b) organisation moléculaire schématique d'un desmosome punctuel.

▲ FIGURE 25. **Desmosomes (MET, modèle simple).** D'après PEYCRU *et al.* (2013)

c. Les jonctions communicantes (jonctions *gap*), un ensemble de tunnels à canal hydrophile peu sélectif assurant une continuité des cytosols des cellules adjacentes

- Les **jonctions lacunaires** (= jonctions communicantes) ou **gap junctions** (figures 26-28) sont des **ensembles de canaux eux-mêmes constitués de deux connexons** (un dans chaque membrane), chaque connexon comprenant six **connexines**. Les **tunnels** présentent un canal de diamètre proche d'1,5 nm, ce qui permet une **continuité entre les cytosols** des cellules ainsi **reliées** et le **passage hydrophile d'ions** ou de **petites molécules organiques** : oses, acides aminés... [poids < 1 kDa] (y compris des **seconds messagers**, ce qui **coordonne** efficacement l'**activité des tissus**).

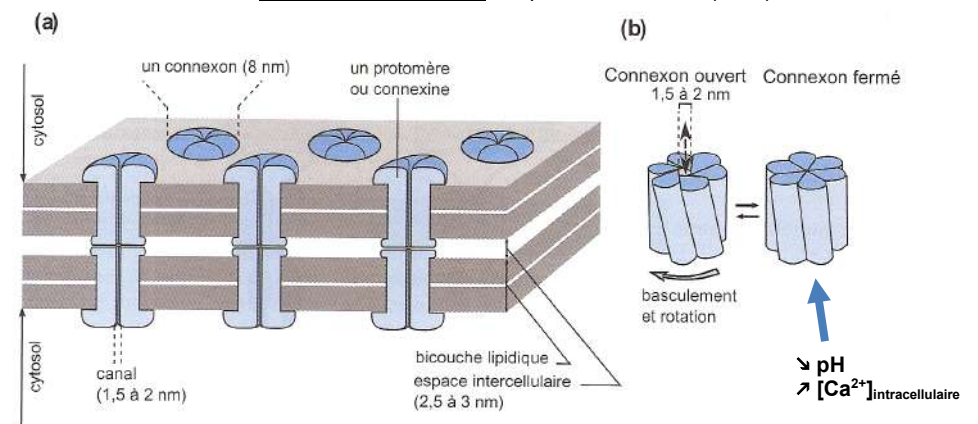
Les **connexons** peuvent aussi **s'ouvrir** ou **se fermer** par **changement de conformation**.



La Jonction communicante.

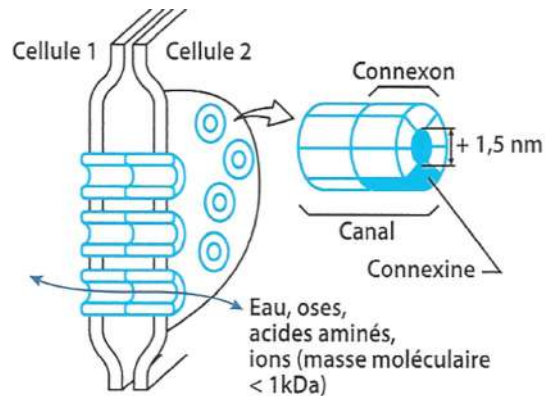
(a) jonction communicante observée en coupe ($\times 85\,000$), (b) observations par cryodécoupage ($\times 85\,000$) et (c) en coloration négative. (Clichés Labo. BG et BC4, Orsay, « Biologie cellulaire », J.-C. Callen, 2^e éd. Dunod, 2005.).

▲ FIGURE 26. **Jonctions *gap* au MET.** D'après PEYCRU *et al.* (2013)



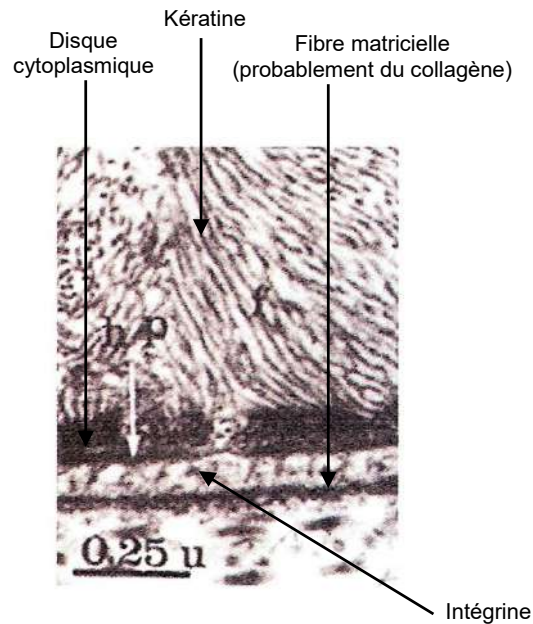
Architecture des jonctions communicantes (a) et modification conformationnelle entre états ouvert et fermé (b).

▲ FIGURE 27. **Jonction *gap*.** D'après PEYCRU *et al.* (2010a).



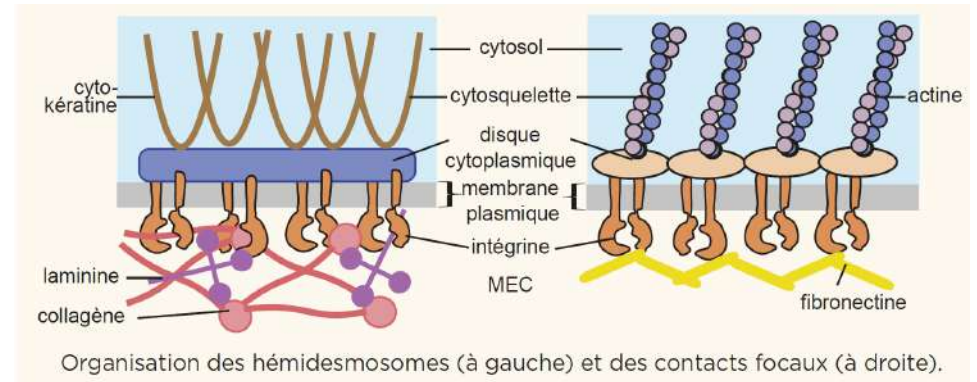
▲ FIGURE 28. **Jonction gap**. D'après DAUTEL *et al.* (2021).
En réalité, il y a plutôt un **rapprochement** qu'un écartement des **membranes** au niveau d'une **jonction gap**.

3. Des jonctions d'ancrage à la matrice extracellulaire : les hémidesmosomes (et les contacts focaux, plus rares dans les épithéliums)

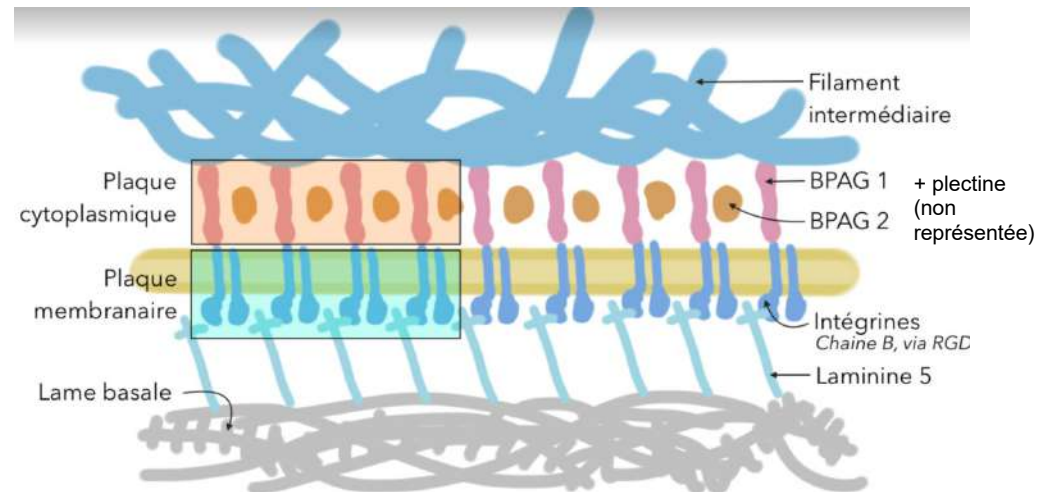


Structure d'un hémidesmosome (Douglas W. H. *et al.* (1970) *J. Cell Biol.* 1, 211-215)

▲ FIGURE 29. **Hémidesmosomes (MET)**. D'après SEGARRA *et al.* (2014)



▲ FIGURE 30. **Hémidesmosomes et contacts focaux : une représentation possible**.
D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)
(!) Les intégrines ne s'accrochent normalement pas directement au collagène.



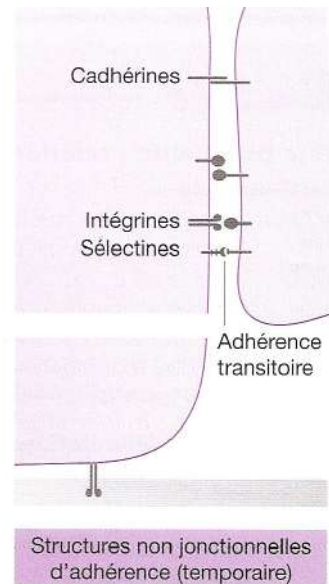
▲ FIGURE 31. **Hémidesmosomes : une représentation possible**.
D'après Celluloyd (consultation décembre 2021).

- Les **hémidesmosomes** (figures 29-31) sont des **jonctions d'ancrage des cellules à la matrice extracellulaire** constituées d'une **plaque d'ancrage** associée à des **kératines** côté cytosolique et à des **intégrines transmembranaires** qui s'associent aux **fibres matricielles** par des **laminines** ou des **fibronectines**.
Ne pas confondre **laminines** (dans la matrice) et **lamines** (composant la lamina dans le noyau) !
- Les **contacts focaux** sont des **jonctions d'ancrage des cellules à la matrice extracellulaire** constituées d'une **plaque d'ancrage** associée à des **microfilaments d'actine** côté cytosolique et à des **intégrines transmembranaires** qui s'associent aux **fibres matricielles** par des **fibronectines**. Ils sont **rare**s dans les **épithéliums** et plutôt **exprimés** dans les **cellules migratrices** (cellules immunitaires, fibroblastes, cellules embryonnaires...).

- Les **intégrines** sont des **protéines dimérisées (chaîne α , chaîne β)** dont seule une chaîne (la **chaîne β**) **s'associe**, via des **liaisons ioniques** faisant intervenir les ions Ca^{2+} , aux **fibronectines** ou **laminines**. Il s'agit de **liaisons plus résistantes** que des **liaisons H**.

4. Existence d'adhésions transitoires, notamment impliquées dans les communications intercellulaires et le développement

- Les **adhésions cellulaires** peuvent être **transitoires (figure 32)**, par exemple :
 - Jonctions cellule-cellule** lors du **développement** ou lors des **réactions immunitaires** qui permettent la **reconnaissance entre cellules** et/ou participent à leur **migration**
 - Jonctions cellule-matrice** qui permettent les **migrations cellulaires**
 - Etc.*



▲ FIGURE 32. **Structures d'adhérences transitoires des cellules animales.**
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

B. Les matrices extracellulaires, des complexes extracellulaires aqueux, fibreux et gélifiés, associant les cellules entre elles

1. Notion de matrice extracellulaire

- Que ce soit la **lame basale** sur laquelle s'arrime les **cellules intestinales** ou la **paroi** qui entourent les **cellules végétales**, les deux types cellulaires sont au contact d'une **matrice extracellulaire**, c'est-à-dire d'un **gel hydraté situé autour des cellules de nombreux tissus et composé notamment de polymères glucidiques et de protéines (tableau III)**.

▼ TABLEAU III. **Composition des matrices extracellulaires.** D'après PEYCRU *et al.* (2013).

COMPOSÉS BIOCHIMIQUES DES MEC ANIMALES.	
Nature biochimique des composants	Noms des molécules et fonction
Protéines	Collagène (constitution de fibres)
	Élastine (constitution de fibres) Fibronectine et laminine (molécules d'adhésion)
Glucides (en association avec des protéines au sein des protéoglycanes)	Glycosaminoglycanes ou GAG : acide hyaluronique, chondroïtine sulfate... (constitution de gels)

LES CONSTITUANTS DES PAROIS VÉGÉTALES.

Classe moléculaire	Type de molécule	Caractères
Glucides	Cellulose (de 30 à 90 % selon les parois)	Homopolymère (1-4 β -glucose) Organisation en fibrilles de 10 à 30 nm de diamètre - Résistance à la traction
	Hémicelluloses (de 20 à 50 %)	Polyosides ramifiés Revêtement des fibrilles de cellulose
	Pectines (de 20 à 30 %)	Acides polygalacturoniques partiellement méthylés - Polyanions hydrophiles en gels
Protéines	Extensine (de 5 à 10 %)	Glycoprotéine riche en hydroxyproline Pontage des polyosides
	Hydrolases (exocellulases, exopectinases), expansine...	Enzymes mises en jeu dans l'élongation cellulaire ou dans la lignification
Métabolites secondaires	Lignine (30 % au mieux)	Cimentation de certaines parois

2. Les matrices extracellulaires animales (MECA)

a. Préalable : rappel de la différence entre épithélium et tissu conjonctif en lien avec la matrice

On rappelle qu'il faut réviser l'**HISTOLOGIE animale**

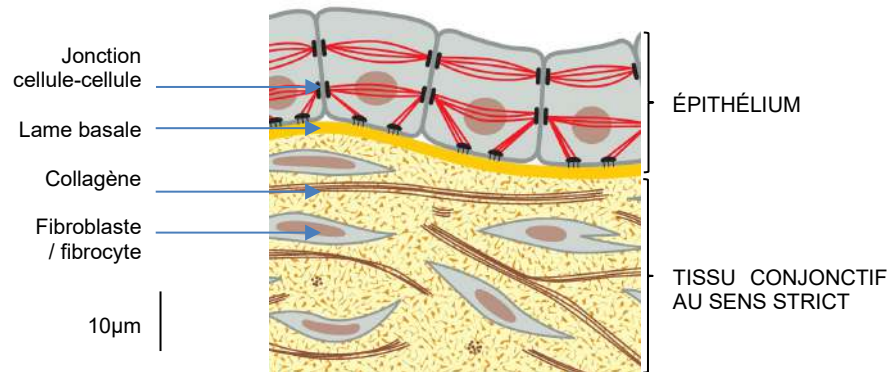
- Parmi les **grands types de tissu animaux**, on peut distinguer :
 - Les **épithéliums** (= **tissus épithéliaux**) dont nous avons déjà rappelé qu'il s'agit de **tissus dont les cellules sont jointives, grâce à des jonctions intercellulaires maintenant les cellules en contact, et s'arriment sur une lame basale**.

La **lame basale** est le nom donné à la **matrice extracellulaire sur laquelle des cellules épithéliales sont accrochées**. C'est un **cas particulier** de matrice extracellulaire et souvent une **portion d'un tissu conjonctif** (au sens strict) **limitrophe**.

- Les **tissus conjonctifs au sens large** qui sont des **tissus dont les cellules sont non jointives et séparées par de la matrice extracellulaire**.

Attention !

- ° Dans le cas de l'**épithélium**, les **cellules** ou une partie d'entre elles sont bien **arrimées à une lame basale** mais elles sont tout de même **attachées entre elles**.
- ° Dans le cas du **conjonctif au sens large**, les **cellules ne sont pas attachées entre elles par des jonctions intercellulaires** ; elles sont **toutes attachées à la matrice extracellulaire** qui se situe donc entre les cellules et c'est la matrice qui les maintient en un ensemble cohérent.



▲ FIGURE 33. **Épithélium vs. conjonctif**. D'après ALBERTS *et al.* (2015).

- Concernant la **diversité des conjonctifs au sens large**, on rappelle qu'ils comprennent :
 - Les **tissus conjonctifs au sens strict** (figure 33) sont **caractérisés par la présence de cellules sécrétrices de matrice extracellulaire nommées fibroblastes (= fibrocytes)**. La matrice est plus ou moins élastique selon les cas ; les **fibroblastes** s'y ancrent notamment par des **contacts focaux**.

Les **conjonctifs au sens strict** sont classiquement sériés en deux grandes catégories :

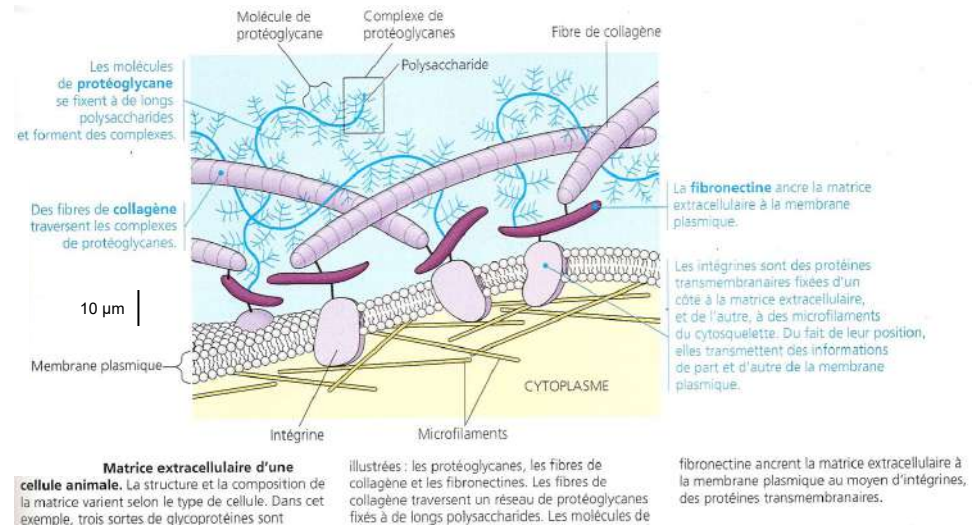
- Le **tissu conjonctif lâche** (= **aréolaire**) **assez souple et élastique grâce à une présence relativement faible du collagène**. On retrouve ce tissu entre les organes, sous la peau...
- Le **tissu conjonctif dense** **assez rigide grâce à de nombreuses fibres de collagène (ou d'élastine)**. On retrouve ce tissu dans les **tendons** des muscles par exemple.

- Le **tissu adipeux**, **tissu dérivant du tissu conjonctif lâche** où les **fibroblastes sont transformés en adipocytes** (qui sont des **cellules stockant de grandes quantités de lipides**).

Les **adipocytes** peuvent être **en contact et se toucher** entre eux, mais **ils ne s'attachent pas entre eux** (= **pas de jonctions cellule-cellule**) : il s'agit donc bien d'un **conjonctif au sens large**.

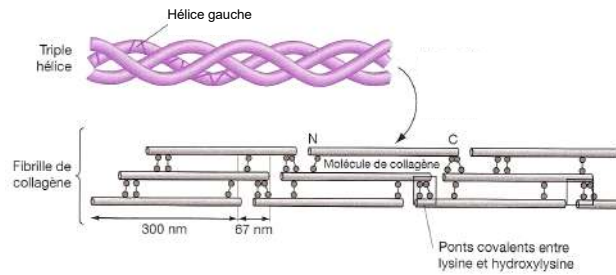
- Le **tissu osseux**, **tissu rigide** où la **matrice extracellulaire est pauvre en eau (50 %) et consolidée par un système cristallisé comprenant des phosphates et du calcium**. Les **cellules qui sécrètent ou dégradent la matrice osseuse** s'appellent des **ostéocytes**.
- Le **tissu cartilagineux** (= **cartilage**), **tissu plus souple qu'on trouve notamment autour des os, consolidé par de la chondroïtine sulfate (un GAG)**. Les **cellules qui sécrètent ou dégradent la matrice cartilagineuse** s'appellent des **chondrocytes**.
- Le **sang**, **tissu constitué de nombreux types de cellules en suspension (cellules sanguines = éléments figurés) dans une matrice liquide (plasma)** qui assure le transport de nombreuses substances (gaz respiratoires, nutriments, hormones...) et participe aux défenses de l'organisme.

b. Constitution et organisation des matrices extracellulaires animales typiques (matrices des conjonctifs au sens strict et lame basale)



▲ FIGURE 34. **Matrice extracellulaire animale**. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

- Une **MECA typique** (= lame basale + dans les tissus conjonctifs au sens strict), comprend (figure 34) :
 - Du **collagène** (figure 35), un assemblage par **liaisons covalentes et hydrogène** de **tropocollagène**, **protéine fibrillaire composée de trois polypeptides enroulés chacun en hélice alpha et tous trois tressés en une superhélice** ; les polypeptides sont associés par des **liaisons covalentes** et des **liaisons H**.
(!) Le collagène **résiste aux forces de tension** et est **quasi-inextensible**.
Sa **structure et sa relation structure-fonction** est traitée dans le **chapitre 8 de biochimie structurale**
 - De l'**élastine** (parfois absente), une **protéine comprenant des acides aminés hydrophobes capables de s'associer entre eux au hasard** (par **interactions hydrophobes** – de faible énergie de liaison) en **recomposant leur organisation**. Il s'ensuit une grande **élasticité** de cette protéine qui **forme des ponts** avec ses semblables et s'organise en **réseau qui peut s'étirer** (figure 36).
(!) Cette protéine **résiste donc aussi aux forces de tensions** par son **élasticité** qui **autorise** néanmoins une **extension relative**.
 - Des **glycosaminoglycanes (GAG)** et **protéoglycanes** qui sont des **molécules très hydrophiles** formant un **gel très hydraté résistant aux forces de compression**.
(!) Un gel **résiste** en effet **aux forces de compression**.
 - Des **protéines d'adhérence aux cellules**, notamment des **fibronectines / laminines** et des **intégrines** qui peuvent former des **jonctions cellules-matrices** de type **hémidesmosome** ou **contact focal**.

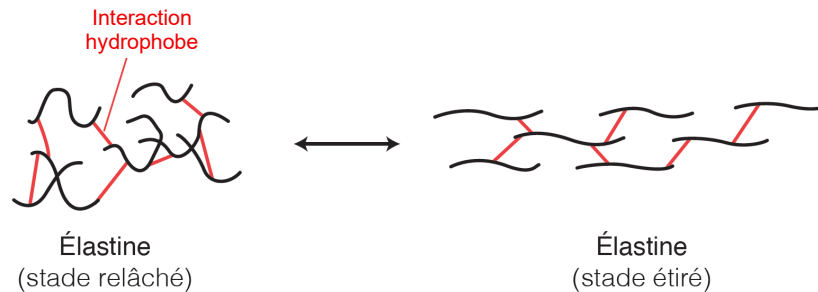


▲ FIGURE 35. **Tropocollagène et fibrille de collagène.** D'après BREUIL (2007).

Rappels :

- Le **tropocollagène** est fait de **3 chaînes polypeptidiques enroulées chacune en hélice gauche**, moins compacte que les hélices alpha (qui sont par ailleurs des hélices droites), et aussi de **sucres** : glucoses, galactoses ; c'est donc une **glycoprotéine** rigoureusement. Il se forme des **liaisons covalentes** entre **hydroxyllysines** et entre **hydroxyprolines**, ainsi que des **liaisons H**, tout cela maintenant l'ensemble associé. Le tropocollagène est donc une **protéine de structure IV**.
- Ce **tropocollagène** s'associe, par des **liaisons covalentes interchaînes** (surtout entre hydroxyllysines, mais aussi entre hydroxyprolines) et des liaisons H, et forme alors des **fibrilles** de **10-30 nm de diamètre** ;
- et ces **fibrilles** s'assemblent en **fibres** de **0,5 à 3 µm** de diamètre.

Il existe de **nombreux types de collagènes** ; ceux-ci constituent les **protéines (ou assemblages protéiques) les plus abondants du règne animal**.

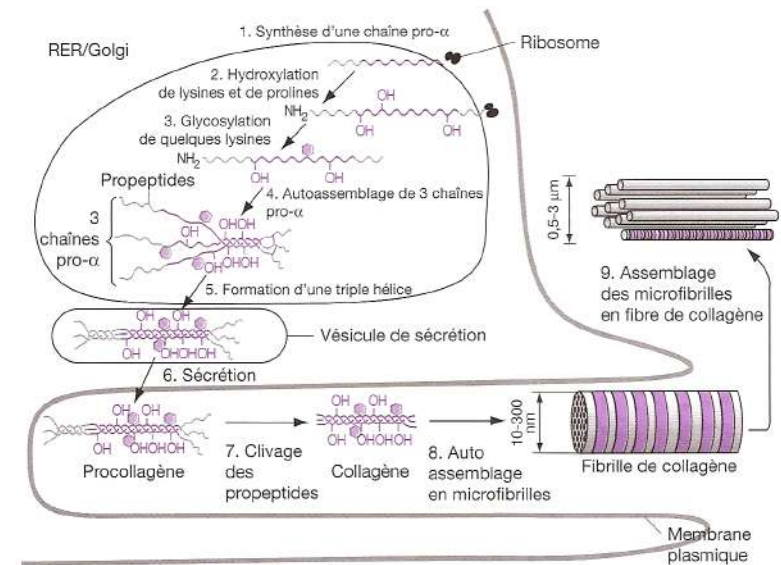


▲ FIGURE 36. **Réseau d'élastine.** D'après SEGARRA *et al.* (2014), adapté.

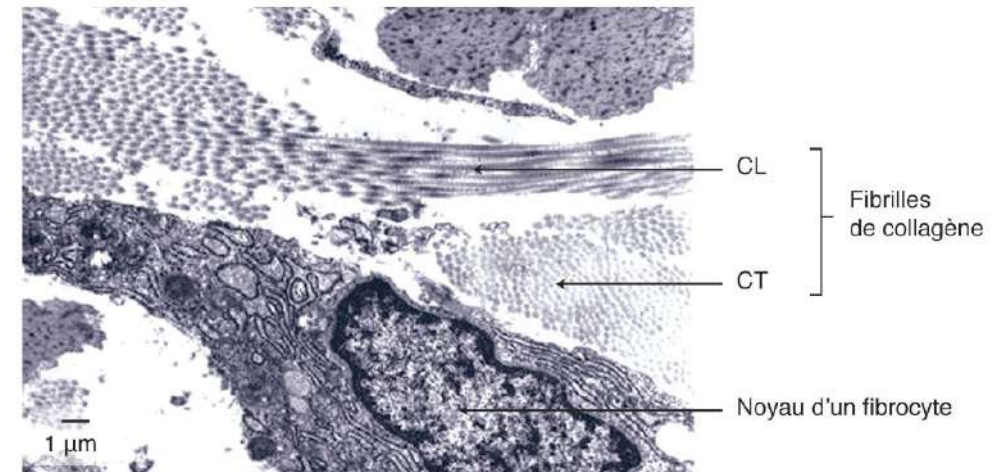
c. Des matrices extracellulaires animales dont les constituants sont produits et exocytés par des fibroblastes

- Les **matrices extracellulaires animales** des **tissus conjonctifs** au sens strict sont **sécrétées par des fibroblastes ou fibrocytes**, **cellules spécialisées dans la synthèse et la sécrétion par exocytose des constituants des matrices animales** (figures 37-37bis).

J'ai découvert récemment que **certains auteurs** (pas tous !) faisaient une **nuance entre fibroblaste et fibrocyte**... Le **fibroblaste** serait la **forme active de la cellule** et le **fibrocyte** la **forme « au repos »**.



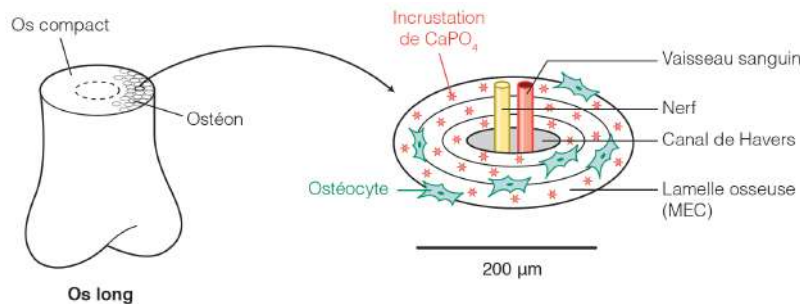
▲ FIGURE 37. **Pour information : synthèse du collagène par un fibroblaste.** D'après BREUIL (2007).



▲ FIGURE 37bis. **Fibrocyte et MECA observés au MET.** D'après SEGARRA *et al.* (2014)

d. Des matrices animales pouvant subir une imprégnation minérale : exemple de l'os

- Comme cela est vu dans le **complément d'Histologie animale**, les MECA peuvent être **sécrétées** par des **types cellulaires autres** et donner du **cartilage**, du **tissu osseux**... Par exemple, dans le **tissu osseux**, il y a **consolidation** du tissu par incrustation de **phosphate de calcium CaPO_4** (figure 38).



▲ FIGURE 38. **Calcification osseuse**. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

3. La paroi, matrice extracellulaire végétale à rôle squelettique

a. Un rôle squelettique, cohésif, dans les échanges (via l'apoplasme) et dans le développement

- La **paroi** est, avec la **pression de turgescence** exercée par le milieu intracellulaire et notamment la **vacuole sur la paroi**, à l'origine de l'**hydrosquelette** végétal.

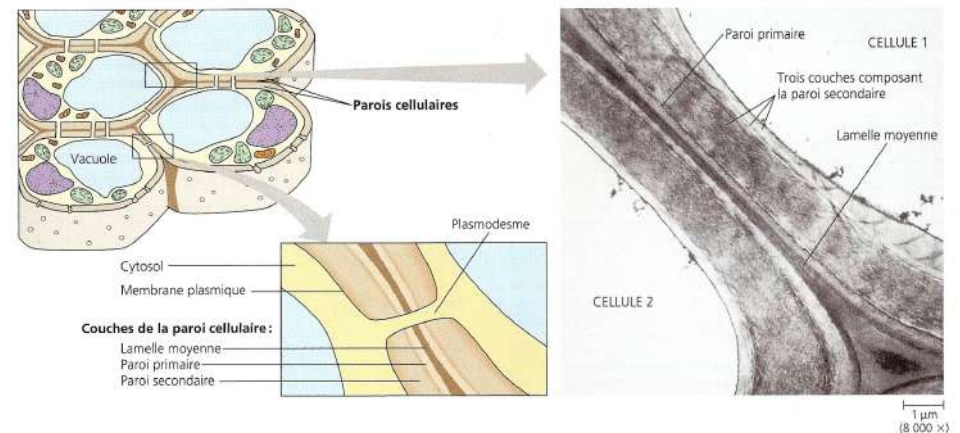
Sa **consolidation** sous forme de **paroi secondaire** (voir plus loin) permet aussi de renforcer son rôle squelettique.

- En l'absence de **jonctions végétales** permettant l'adhésion de la cellule à la paroi ou aux autres cellules, c'est encore la **paroi** qui assure la **cohésion des tissus**, les **cellules** étant **plaquées** contre elle par la **turgescence**.
Notons que les **plasmodesmes** (voir C) assurent tout de même un **contact** et une **cohésion entre cellules adjacentes**.
- Le **continuum des parois (apoplasme)** permet la **circulation d'eau** et du **substances hydrophiles, nutritives** ou **informationnelles**. Cette circulation peut être modifiée par la modification de composition de la paroi.
- Enfin, le **duo paroi-turgescence** permet l'**auxèse, elongation des cellules** indispensable au développement végétal.

b. Composition et organisation de la paroi primaire

- La **paroi primaire** végétale (figures 39-40, tableau IV) se compose de :
 - Cellulose** : il s'agit d'un **homopolymère de glucoses en β 1-4** qui s'associe en **paquets de 80 celluloses environ et en moyenne (microfibrilles)** grâce à des **liaisons H** interchaînes.
 - (!) La **cellulose**, polymère longitudinal stable, est **très résistante aux forces de tension**.

- Pectines** : il s'agit du **principal agent gélifiant de la paroi, très hydrophile** et faisant de **nombreuses liaisons avec l'eau** ; on y trouve aussi les fameux ions **Ca^{2+}** pris dans des **structures en boîtes à œufs**.
(!) Le **gel hydraté** ainsi constitué est particulièrement **résistant aux forces de compression**.
- Hémicelluloses** : il s'agit d'**hétéropolyosides ramifiés** qui **permettent de faire des ponts entre fibrilles de celluloses mais aussi avec d'autres constituants pariétaux**.
- De **protéines HRGP** (Hydroxyprolin Rich GlycoProteins) = **extensines** : ce sont des **protéines fibrillaires permettant, par le maillage qu'elles constituent, d'associer les fibrilles de cellulose**
- D'**enzymes** (expansines, hydrolases...) qui modifient la structure de la paroi et **facilitent ou entravent par exemple son extension**.

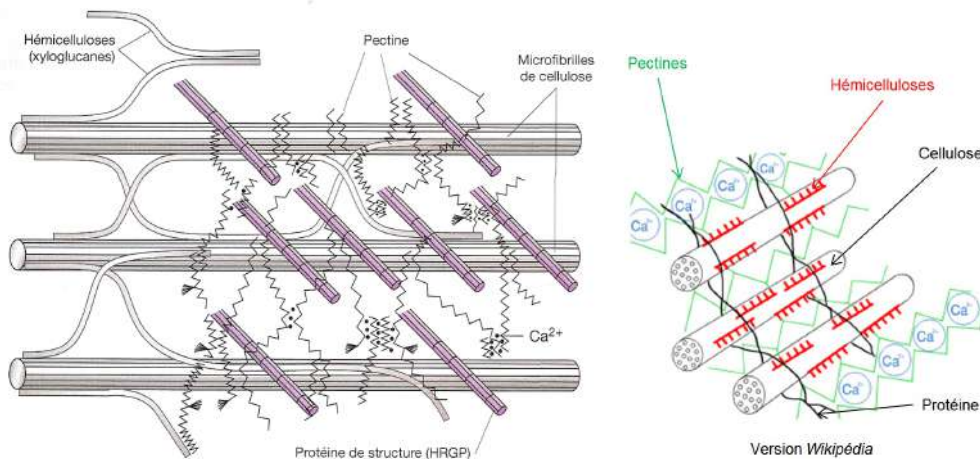


Paroi cellulaire végétale. Les cellules immatures commencent par élaborer une paroi primaire. Au terme de leur croissance, elles érigent une paroi secondaire, plus résistante, entre la paroi primaire et la membrane plasmique. Une lamelle moyenne adhésive cimente les cellules adjacentes. Les parois cellulaires ne sont pas étanches : des canaux appelés plasmodesmes les traversent et établissent un lien entre les cytoplasmes de cellules voisines (MET).

▲ FIGURE 39. **Organisation de la paroi**. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

▼ TABLEAU IV. **Les principaux constituants pariétaux**.
D'après ALBERTS *et al.* (2004)

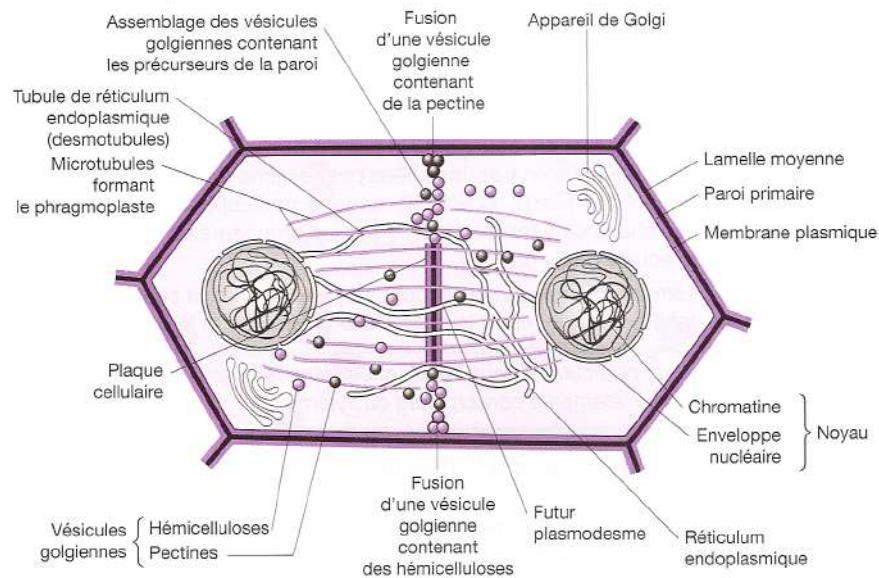
POLYMÈRE	COMPOSITION	FONCTIONS
Cellulose	Polymère linéaire du glucose	Les fibrilles confèrent à toutes les parois une résistance élastique à la tension
Glycanes de liaisons croisées	Xyloglycanes, glucuronoarabinoxylanes et mannanes	Relient les fibrilles de cellulose en des réseaux résistants
Pectine	Homogalacturonanes et rhamnogalacturonanes	Forme des réseaux de charge négative, hydrophiles, qui donnent une résistance compressive aux parois primaires; adhésion cellule-cellule
Lignine	Alcools de coumaryl, coniferyl et sinapyl formant des liaisons croisées	Forme des polymères résistants étanches qui renforcent les parois cellulaires secondaires
Protéines et glycoprotéines	Enzymes, protéines riches en hydroxyprolines	Responsables du renouvellement de la paroi et de son remodelage, facilitent la défense contre les germes pathogènes



▲ FIGURE 40. Deux visions de l'organisation des constituants pariétaux.
D'après BREUIL (2007) et Wikipédia.

c. Synthèse et mise en place des constituants pariétaux

a. Mise en place précoce : édification du phragmoplaste par fusion de vésicules golgiennes pectiques et hémicellulosiques



▲ FIGURE 41. Mise en place du phragmoplaste lors de la cytotéière au sein des cellules méristématiques. D'après BREUIL (2007).

- Entre deux parois, on trouve une **lamelle moyenne essentiellement pectique qui se met en place lors de la cytotéière végétale** : il y a mise en place d'une **plaque cellulaire** ou **phragmoplaste*** par **accrétion et fusion de vésicules golgiennes** (figure 41). Ces vésicules golgiennes contiennent essentiellement des **pectines** mais aussi des **hémicelluloses**.

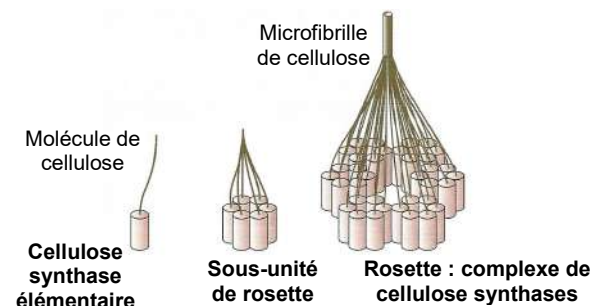
C'est au niveau des **zones où des portions de REG sont « piégées »** que se forment les **plasmodesmes**.

*** (!) Ce mot peut aussi désigner, pour certains auteurs (ex. figure 31), le réseau de microtubules acheminant les vésicules golgiennes jusqu'au niveau de la plaque cellulaire en formation.**

β. La mise en place des celluloses : un processus membranaire

i. Une mise en place à partir d'UDP-glucose assurée par les celluloses synthases

- La **synthèse des fibrilles de cellulose** intervient ensuite, tout au long de la vie de la cellule, notamment lors de phases de **croissance** ou de **différenciation**, grâce à des **celluloses synthases** (ou **celluloses synthétases**) **membranaires** qui **synthétisent les microfibrilles à partir d'UDP-glucoses**. Ce sont en fait des **complexes de celluloses synthases** (mais, pour certains auteurs, tout le complexe forme la cellulose synthase !) (figures 42-43) ; les complexes ont une **structure en rosette** ; cette **rosette** est elle-même constituée de **sous-unités** qui sont à leur tour composées chacune de **6 enzymes productrices d'une molécule de cellulose**.

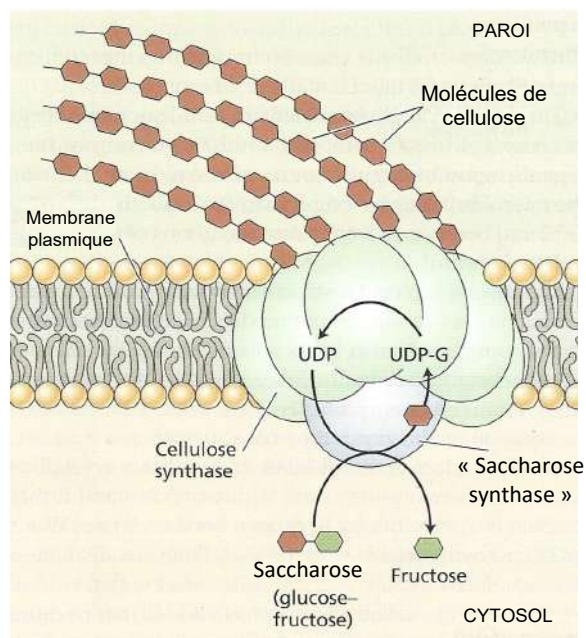


▲ FIGURE 42. Organisation des celluloses synthases. D'après TAZ & ZEIGER (2010).

Dans le modèle proposé à la figure 42, les microfibrilles ne contiennent que **36 celluloses** au total mais souvent les microfibrilles sont plus grosses (**env. 80 molécules de cellulose**). Les **liaisons H interchaînes** se forment en même temps que les **molécules sont synthétisées**. Certains auteurs avancent que ces **microfibrilles** peuvent ensuite **s'assembler en fibrilles de plus gros diamètre** (jusqu'à **1500 molécules de cellulose**).

- Les **monomères de la cellulose** sont ajoutés à partir d'**UDP-glucose** qui semble formé par une **enzyme associée au complexe de celluloses synthases côté cytosolique** : l'enzyme catalyse une **réaction dont les réactifs sont l'UDP et le saccharose et dont les produits sont le fructose et l'UDP-glucose** (lequel peut alors servir à la **synthèse de cellulose**).

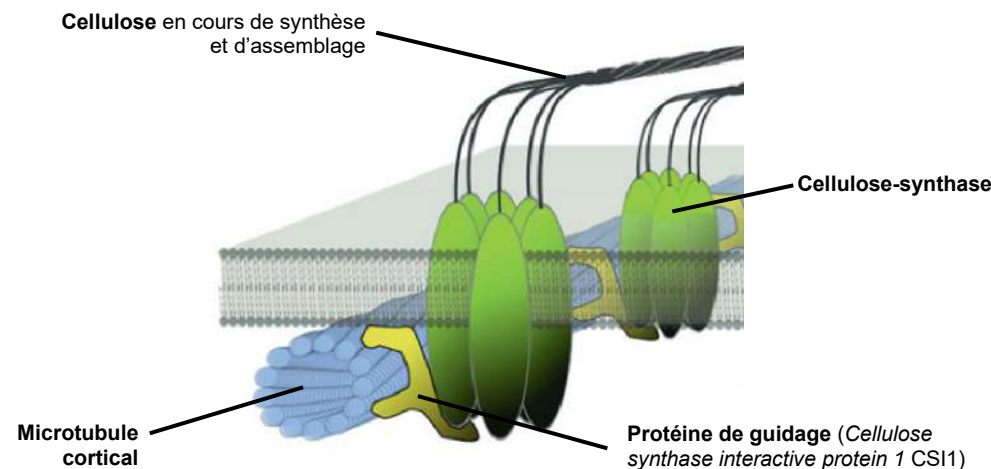
Cette enzyme est appelée « **sucrose synthase** » (que l'on peut traduire par « **saccharose synthase** » en français), même si, comme le notent BUCHANAN *et al.* (2015), **le terme peut prêter à confusion car un tel nom d'enzyme pourrait laisser qu'il y a synthèse de saccharose, or c'est un substrat ici !** C'est pourtant bien le nom de cette enzyme...



▲ FIGURE 43. Fonctionnement d'un complexe de cellulose synthases.
D'après TAIZ & ZEIGER (2010), traduit.

ii. Une mise en place guidée par les microtubules corticaux

- De nombreux travaux laissent à penser que la **mise en place de la cellulose** se fait **parallèlement à l'orientation des microtubules corticaux** (situés juste **sous la membrane plasmique**) (figure 44).
- On sait que les **cellules végétales** sont capables de **modifier très rapidement l'orientation de leurs microtubules corticaux** – même si les mécanismes exacts sont encore largement incompris – et cela modifierait en conséquence l'**orientation des microfibrilles en cours de synthèse**, ce qui permet par exemple de produire une **paroi secondaire** (voir **plus loin**).

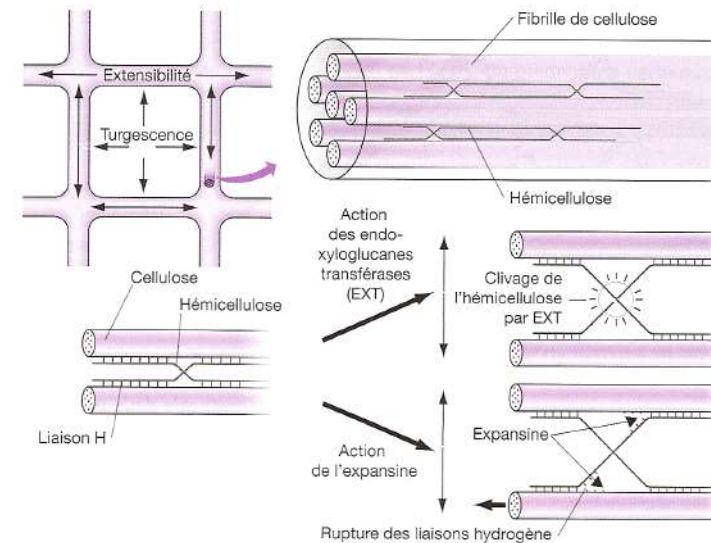
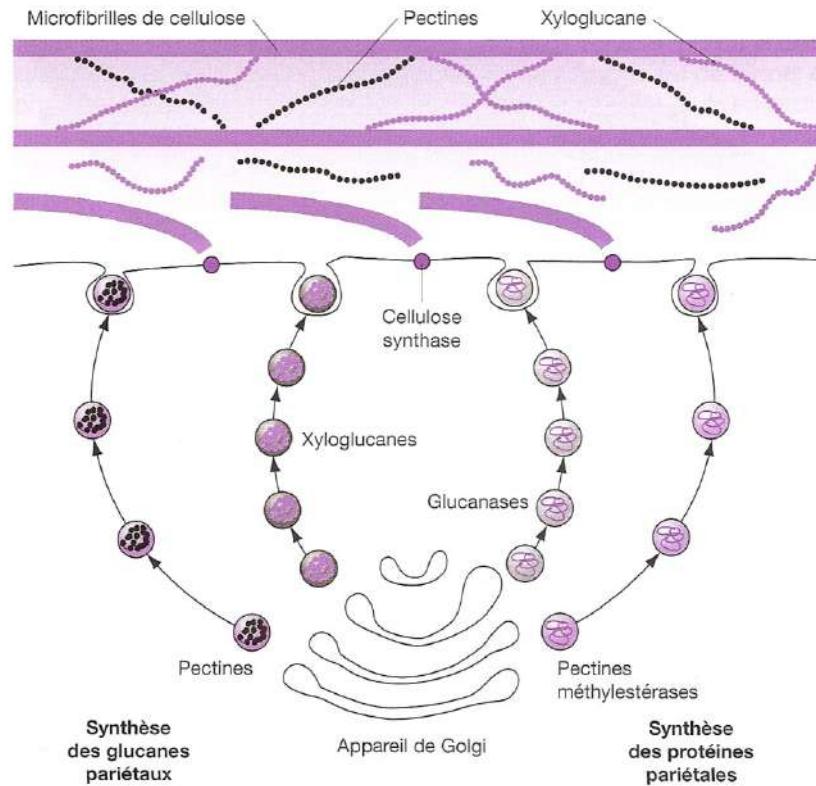


▲ FIGURE 44. Rôle des microtubules dans l'orientation de la synthèse de cellulose : un modèle possible. D'après BRINGMANN *et al.* (2012), adapté.

γ. Apport des constituants non cellulotiques aux parois par exocytose

- Les **autres composés** (pectines, hémicelluloses, protéines...) sont **synthétisés dans des vésicules golgiennes et apportés par exocytose** (figure 45), comme lors de l'élaboration de la plaque cellulaire (voir **plus haut**).

Les voies précises de **synthèses des glucides pariétaux autres que la cellulose** sont **complexes** et semblent **totalement hors de propos** dans notre programme.



Mécanismes d'élongation de la paroi primaire

Les expansines sont des protéines présentes dans la paroi qui, à pH acide, semblent s'insérer entre les hémicelluloses et les microfibrilles de cellulose brisant ainsi les liaisons hydrogène qui les relient. La pression de turgescence est alors suffisante pour faire glisser les microfibrilles de cellulose les unes sur les autres. Les endo-xyloglucanases sont des enzymes pariétales qui deviennent actives à pH acide. Elles coupent un fragment d'une hémicellulose (xyloglucane) donneuse et l'intercalent dans une hémicellulose receveuse qui se trouve ainsi allongée alors que l'autre est rompue. Les deux microfibrilles de cellulose glissent l'une sur l'autre sous l'effet de la pression de turgescence.

▲ FIGURE 45. Importance de l'exocytose dans la mise en place des constituants pariétaux. D'après BREUIL (2007).

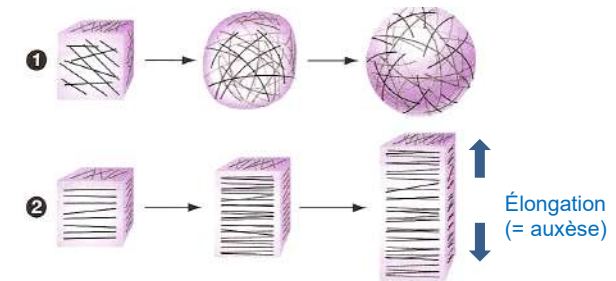
6. Une paroi primaire qui peut autoriser l'élongation

Voir chapitre sur le développement végétal (BCPST2)

- Rappelons simplement ici que l'**acidification des parois** et **diverses enzymes** permettent le **relâchement de la paroi** qui autorise ensuite l'**élongation cellulaire** grâce à la **pression de turgescence** (figure 46).

Il y a notamment **clivage des hémicelluloses** ou **dissociation des hémicelluloses et celluloses**, laissant ainsi les **fibrilles de celluloses « libres »** de se déplacer les unes par rapport aux autres (figure 46).

- L'**orientation de la croissance** est contrainte par l'**orientation des fibrilles de cellulose** (figure 46).
- Cette croissance cellulaire s'accompagne d'une **synthèse continue de nouveaux composés pariétaux** (**intussusception**).



Influence de l'orientation des microfibrilles de cellulose sur le sens de la croissance cellulaire

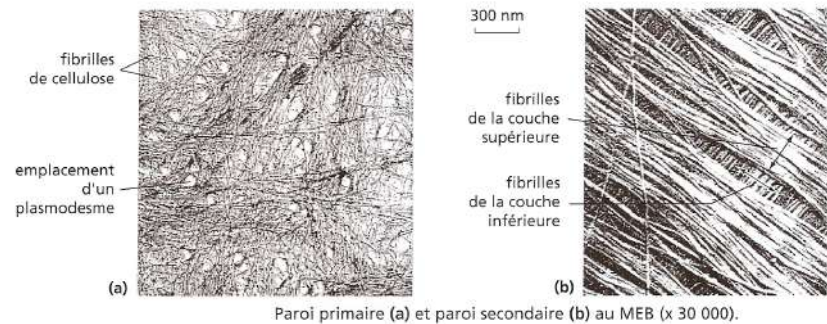
1. Une orientation aléatoire des microfibrilles conduit à une croissance isotrope. 2. Orientation des microfibrilles perpendiculairement au grand axe conduisant à une élongation dans le même sens.

▲ FIGURE 46. Élongation de la paroi primaire. D'après BREUIL (2007).

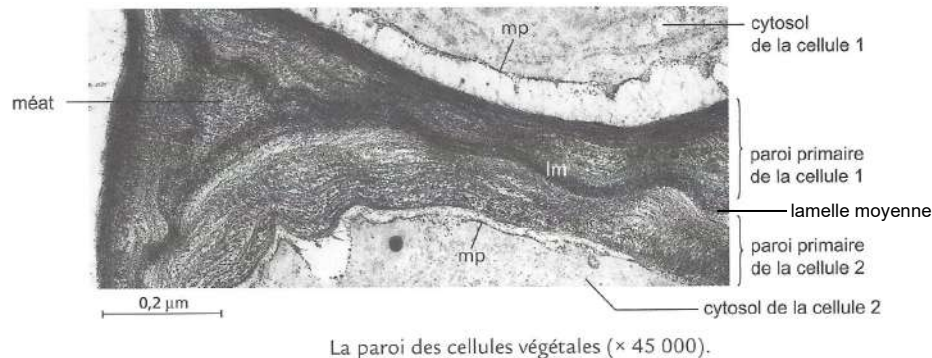
d. Mise en place de la paroi secondaire, une paroi inextensible et différenciée

a. Notions de paroi primaire et paroi secondaire

- On peut distinguer **deux types de paroi** :
 - La **paroi primaire** : **paroi des cellules méristématiques ou des cellules jeunes peu différenciées, peu épaisse (une seule couche de cellulose avec la même orientation des microfibrilles pour certains auteurs) et qui peut dès lors subir une élongation cellulaire (figure 47-47bis-48).**
 - La **paroi secondaire** : **paroi des cellules différenciées qui ne peut plus subir l'élongation cellulaire (figure 47-48).** La paroi primaire peut ainsi subir des **ajouts de couches de cellulose successives où l'orientation des microfibrilles diffère (figure 47)**, une **rigidification par ajout de subérine ou de lignines** ou encore une **ornementation en lien avec la fonction de la cellule** (exemple des cribles, ou des ornements de vaisseaux).

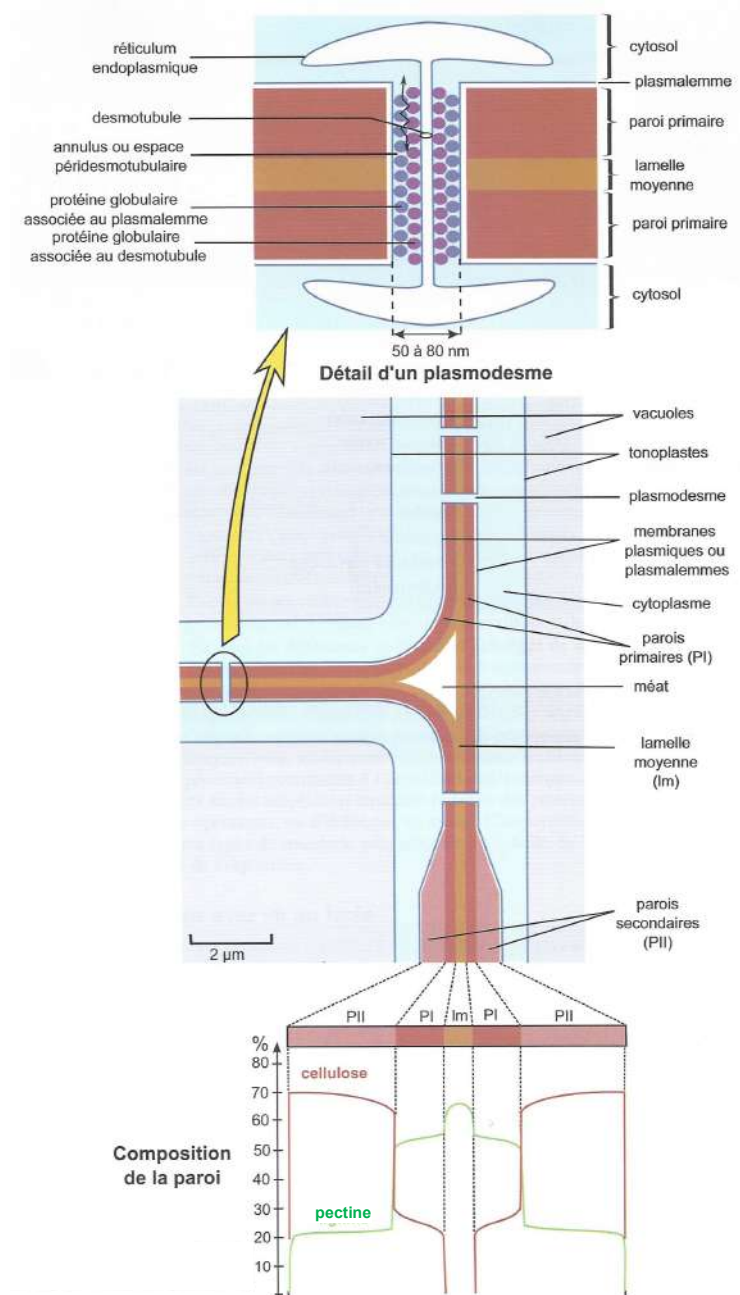


▲ FIGURE 47. **Paroi primaire et paroi secondaire.** D'après PEYCRU *et al.* (2010a).



Racine de pois. lm : lamelle moyenne, mp : membrane plasmique. (Cliché tiré de « Atlas de biologie cellulaire », J.-C. Roland, J.-C. Callen, A. et D. Szöllösi, 5^e éd. Dunod, 2001.)

▲ FIGURE 47bis. **Paroi primaire végétale.** D'après PEYCRU *et al.* (2013)



▲ FIGURE 48. **Paroi primaire et paroi secondaire.** D'après PEYCRU *et al.* (2010a), corrigé.

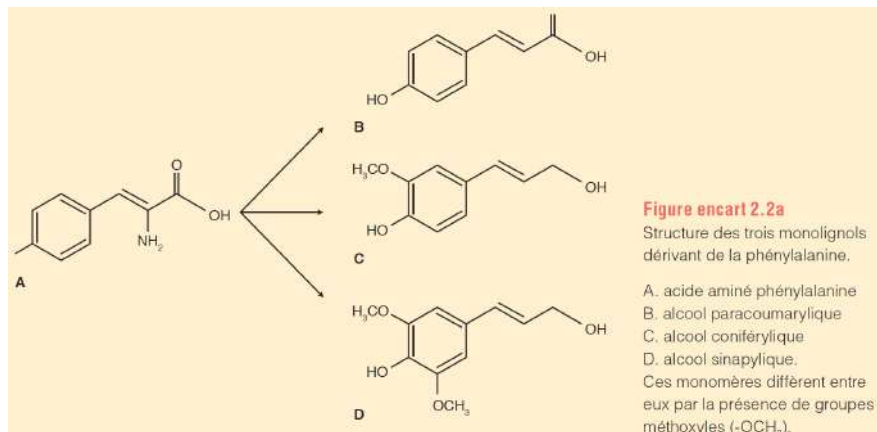
Encadré B Les lignines : des polyphénols incrustants de la paroi végétale

Pour information - d'après SEGARRA et al. (2014)

La lignine est un des principaux composants du bois, où elle imprègne la paroi des vaisseaux et des fibres. Les lignines sont caractéristiques des trachéophytes ou végétaux vasculaires tels que les filicophytes, les pinophytes, les angiospermes. La synthèse des lignines est apparue il y a 380 millions d'années, au Dévonien, avec les premiers végétaux vasculaires. Cette capacité a permis un port érigé aux végétaux terrestres favorisant la réception de l'énergie lumineuse.

► Nature de la lignine

La lignine est un polymère aromatique très ramifié formant un **réseau tridimensionnel hydrophobe complexe**. Les unités de base de la lignine sont les **monolignols**, qui sont des dérivés de l'acide aminé phénylalanine. Il en existe trois principaux types (figure encart 2.2a) : l'alcool paracoumarylique, l'alcool coniferylque, l'alcool sinapylque. La fraction de chaque monolignol varie de façon importante en fonction de la lignée végétale (angiosperme mono- ou dicotylédone, pinophyte), l'espèce, l'organe, le tissu.



La biosynthèse des monomères de lignine fait intervenir plusieurs enzymes du cytoplasme (figure encart 2.2b, partie cytoplasme).

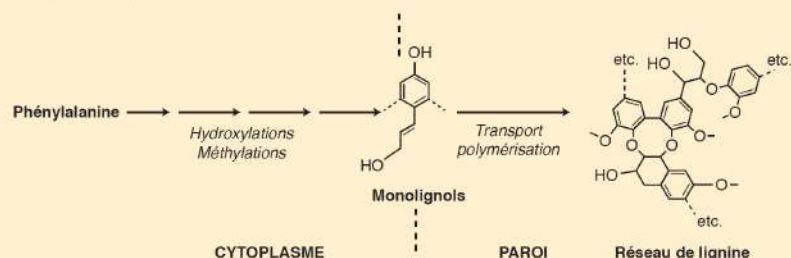


Figure encart 2.2b

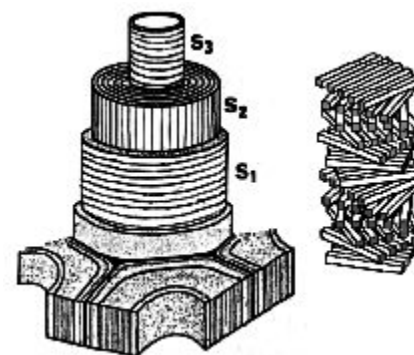
Biosynthèse des monolignols dans le cytoplasme et des lignines dans la paroi

β. Une différenciation de la paroi en paroi secondaire qui repose sur deux processus

- La différenciation de la paroi peut reposer sur **deux processus** – soit *seulement le premier*, soit *les deux qui se superposent*.

i. L'épaississement pariétal par ajout de couches de cellulose

- L'épaississement pariétal est permis par l'intussusception de **nouveaux composés pariétaux** (celluloses, hémicelluloses, pectines, protéines...). Les **nouvelles couches de celluloses** présentent généralement une **orientation différente** de la couche de **paroi primaire** (grâce à un remodelage des **microtubules corticaux**), ce qui contribue fortement à **rigidifier** l'ensemble et **interdire toute élongation** ultérieure (figure 49).
- Exemple de tissu typiquement constitué d'épaississement celluloliques : le collenchyme.



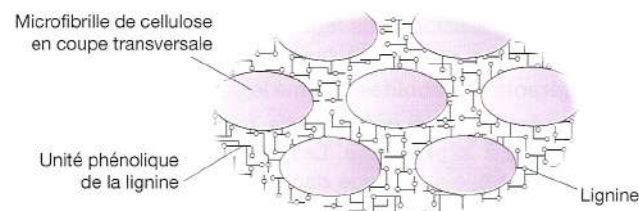
▲ FIGURE 49. **Paroi secondaire.**

Le **numéro des couches** indique leur **ordre de mise en place** (notez que la **paroi primaire** est la **plus externe** puisque la mise en place de **nouveaux composés** est assurée par la **membrane plasmique**). Le schéma de droite montre les différences dans l'**orientation des couches de cellulose**. <http://alain.lhermite.pagesperso-orange.fr/paroi.htm> (consultation avril 2016)

ii. La modification de la composition pariétale par imprégnation de molécules variées (lignines, subérines, cutines)

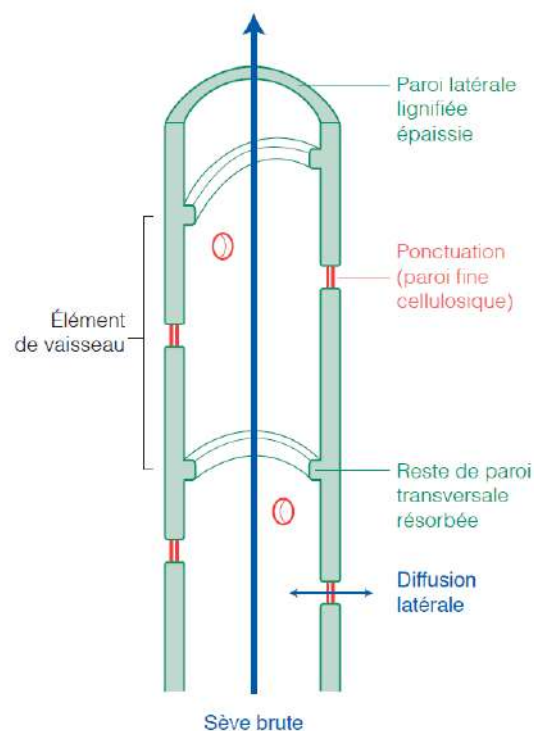
- Voir figures 50-51.
- L'imprégnation de lignines (figures 40-41) (encadré B) a notamment un **effet rigidifiant**.

Les parois de certaines cellules végétales, comme les cellules des tissus de revêtement, sont imprégnées de différentes substances hydrophobes (cires, cutine, subérine) qui leur confèrent de nouvelles propriétés (imperméabilité notamment).



Polymérisation des lignines entre les microfibrilles de cellulose

▲ FIGURE 50. Imprégnation de la paroi lors de sa différenciation : exemple de la lignification. D'après BREUIL (2007).



▲ FIGURE 51. Un élément de vaisseau (paroi très différenciée). D'après SEGARRA et al. (2014).

4. Comparaison des matrices extracellulaires animales et végétales

- Il est remarquable de constater que des **constituants différents** assurent des **fonctions semblables** (tableau V + figures 52-54) dans les **matrices animales et végétales** :

Fibrilles : résistance aux forces de tension

Collagène dans les MEC animales / **cellulose** dans la paroi végétale (**rigidité**)

+ parfois **élastine** dans les MECA (**élasticité**)

Substances gélifiantes : résistance aux forces de compression (élasticité) + diffusion de substances dans le gel ainsi constitué

Protéoglycanes et **glycosaminoglycanes** dans les MEC animales / **pectines** dans la paroi végétale

Liants et éléments stabilisateurs

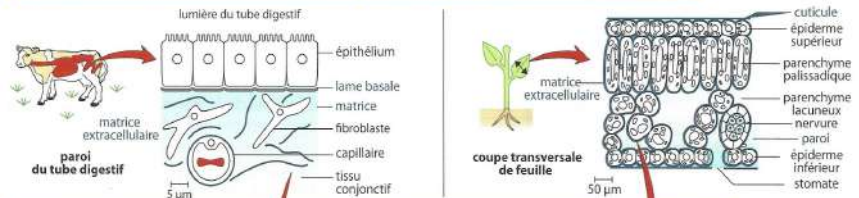
Fibronectine ou **laminine** (ancrage des cellules) dans les MEC animales

hémicelluloses (et **pectines**) + **extensines** (**protéines**) dans la paroi végétale

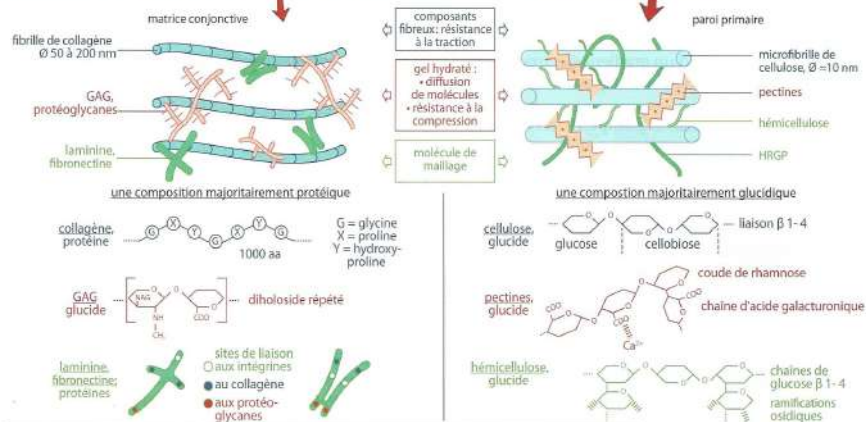
▼ TABLEAU V. Comparaison des matrices extracellulaires. D'après PEYCRU et al. (2013).

	Matrice animale	Matrice végétale
Constituants fibrillaires	- Collagènes (protéines fibrillaires) - Elastine (protéine hydrophobe riche en proline et glycine)	Cellulose (homopolymère de D-glucose en liaison $\beta(1-4)$)
Constituants formant un gel	- Glycosaminoglycanes (polymères linéaires de dérivés d'oses dont certains ionisables) - Protéoglycanes (protéines portant de nombreuses chaînes de glycosaminoglycanes)	Pectines (polymères ramifiés de dérivés d'oses dont certains ionisables)
Constituants permettant l'adhérence et / ou la cohésion	- Fibronectine (glycoprotéine dimérique) - Laminine (3 protéines)	- Hémicellulose (hétéropolymère de D-glucose en liaison $\beta(1-4)$ avec des ramifications constituées d'oses divers) - Extensine... (protéine)
Fonctions des MEC	- Cohésion des tissus - Maintien d'un environnement aqueux - Contrôle de la diffusion de certaines molécules (métabolites, molécules de signalisation) - Rôle de soutien (surtout pour les MEC minéralisées) - Ancrage des cellules épithéliales - Rôle dans la migration des cellules	- Cohésion des tissus - Maintien d'un environnement aqueux - Contrôle de la diffusion de certaines molécules (métabolites, molécules de signalisation) - Rôle de soutien (surtout pour les parois lignifiées)

LES CELLULES ANIMALES ET VÉGÉTALES SONT AU CONTACT DES MATRICES EXTRACELLULAIRES



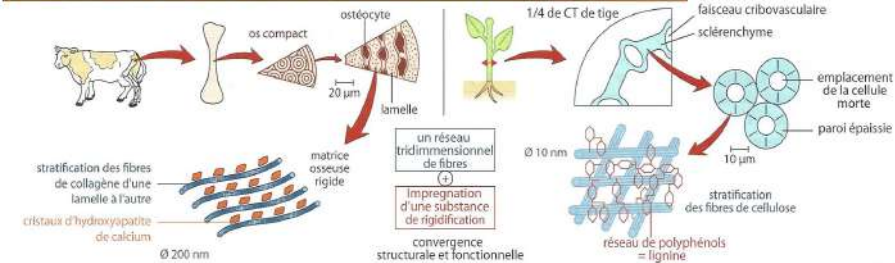
DIVERSITÉ BIOCHIMIQUE ET COMPLÉMENTARITÉ FONCTIONNELLE DES COMPOSANTS DES MATRICES



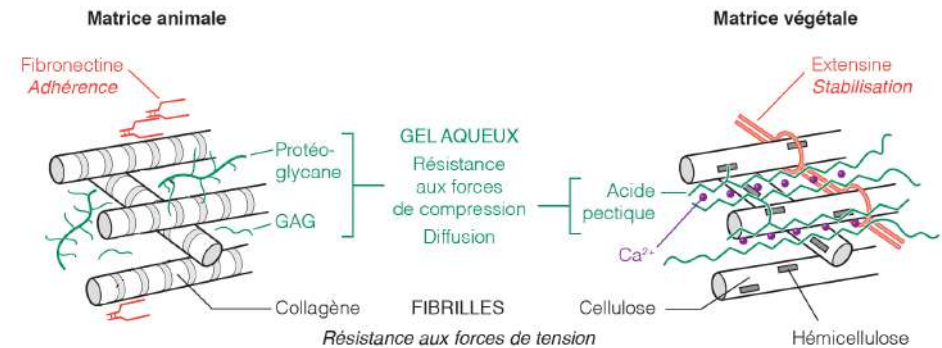
DES MATRICES EXTRACELLULAIRES SYNTHÉTISÉES PAR LES CELLULES À LEUR CONTACT



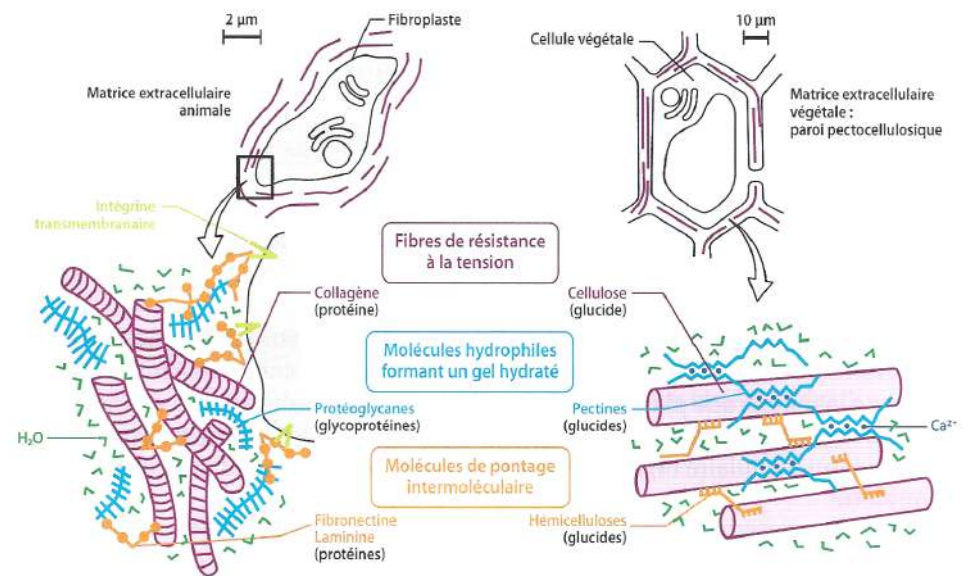
UN EXEMPLE DE SPÉCIALISATION : RIGIDIFICATION DE LA MATRICE ET FONCTION DE SOUTIEN



▲ FIGURE 52. Vue d'ensemble sur les matrices extracellulaires eucaryotes.
D'après SAINTPIERRE *et al.* (2017).



▲ FIGURE 53. Comparaison MECA-paroi végétale. D'après SEGARRA *et al.* (2014), modifié.



Les matrices extracellulaires animales et végétales :
des compositions différentes pour des fonctions identiques.

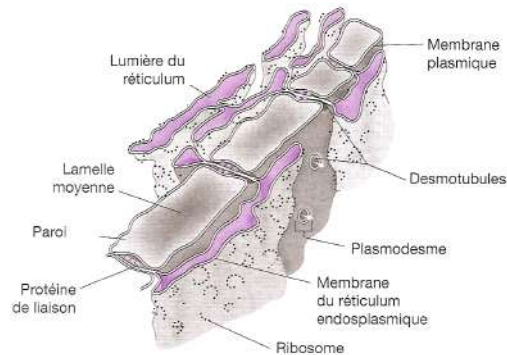
▲ FIGURE 54. Comparaison MECA-paroi végétale. D'après DAUTEL *et al.* (2021).

C. La possibilité d'un continuum cytoplasmique entre cellules adjacentes

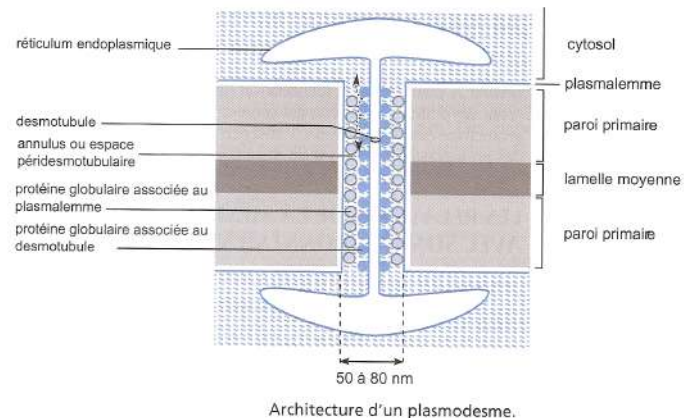
1. Un continuum permis par les jonctions gap chez les Animaux et les plasmodesmes chez les végétaux

- La continuité des cytoplasmes de cellules adjacentes est permise :
 - Par les **jonctions gap** chez les **Mammifères** [voir plus haut],
 - Par les **plasmodesmes** chez les **Angiospermes**, seules structures végétales parfois considérées comme des « jonctions ». On notera qu'ils n'ont **pas le rôle des jonctions animales** dans la **cohésion des tissus** qui est essentiellement due à la **paroi** dans les **tissus végétaux**.

2. Focus sur les plasmodesmes végétaux ; notion de symplasma



Les plasmodesmes, zones de communication entre les cellules végétales
Les discontinuités dans la paroi sont traversées par des tubes issus du RER (desmotubules) qui relient les lumières du réticulum de deux cellules adjacentes. Les plasmodesmes assurent la continuité membranaire de toutes les cellules vivantes de l'organisme et laissent passer des molécules de petites tailles par l'intermédiaire du réticulum et de la fine couche de hyaloplasme qui les entourent. Des protéines assurent le maintien du desmotubule dans le plasmodesme.



Architecture d'un plasmodesme.

▲ FIGURE 55. **Plasmodesmes**. D'après BREUIL (2007) et PEYCRU *et al.* (2010a).

- Les **plasmodesmes** (figure 55) sont des **interruptions de la paroi végétale assurant la continuité cytoplasmique entre deux cellules adjacentes** où l'on trouve également des **protéines structurales variées** et un **desmotubule**, fin tubule reliant le REG des cellules adjacentes.

Ce ne sont **pas vraiment des complexes protéiques associant directement deux membranes** et donc leur classement comme **jonction** est litigieux.

- Le **continuum des cytoplasmes des cellules végétales induit par les plasmodesmes** s'appelle le **symplasma**.

3. Conséquence fonctionnelle : la circulation de matière (particules de taille modérée) et d'information

- Dans les **deux cas**, seuls passent les **ions** et les **petites molécules** (PM < 1 kDa pour les jonctions gap).

Les **plasmodesmes** sont pourtant **bien plus larges** que les **tunnels de jonctions gap** mais, avec leur **occupation** par le **desmotubule** et les **complexes protéiques**, la **filtration des molécules par la taille** est importante.

- La **matière** peut circuler de **cellule en cellule**. C'est **très important** dans les **cellules végétales** où cela assure l'**arrivée de matière** (eau, nutriments...) dans les **cellules à distance des tissus conducteurs**, sachant que la **voie apoplastique** peut aussi être empruntée.
- Des **molécules informatives** (phytohormones végétales ; **seconds messagers**...) peuvent circuler entre les cellules. Elles peuvent participer à la **coordination de l'activité** des tissus.

Bilan (adapté du programme)

- ✓ Les **jonctions** et les **interactions cellule-matrice** assurent la **cohésion** et participent à la **communication** entre **cellules animales**.
- ✓ Pour les **Angiospermes**, ces fonctions sont assurées par la **paroi** et les **plasmodesmes**.
- ✓ Les **matrices extracellulaires** présentent une **structure en réseau** dont l'**organisation** et la **composition** varient en fonction des **organismes** et des **tissus**.
- ✓ Les **matrices extracellulaires** peuvent être **rigidifiées** notamment par une **imprégnation de lignine** ou de **substances minérales**.

III. Des cellules qui coopèrent, dont l'activité est coordonnée et qui peuvent interagir avec d'autres organismes

Capacité exigible

- ✓ Identifier les partenaires d'une association interspécifique impliquant des microorganismes par observation microscopique (microbiote intestinal, nodosité).

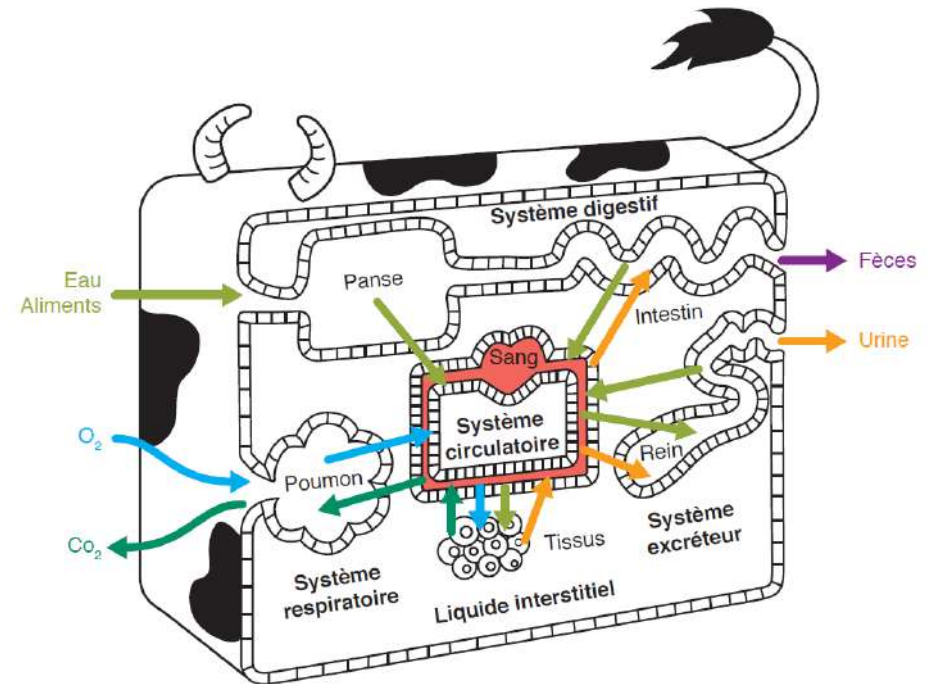
A. Une coopération des cellules / tissus / organes spécialisés au sein de l'organisme

- Un **organisme pluricellulaire** présente :
 - Des **cellules / tissus / organes spécialisés** (que l'on peut regrouper en **grands appareils**) ;
 - Une **mise à distance** de l'environnement de **nombreuses cellules**, ce qui implique :
 - Des **surfaces d'échanges spécialisées** avec l'environnement, permettant les **échanges de matière, d'énergie voire d'information** avec cet environnement ;
 - Un **déplacement de la matière** (+ de l'énergie / de l'information) dans l'organisme, assuré par la **fonction de circulation**.
 - Une **coordination des fonctions** permise par des **systèmes de communication** (voir ci-dessous : B).

1. Chez les Métazoaires : l'exemple de la coopération entre fonctions de nutrition

Revoir le cours sur la Vache (chapitre 1)

- Les **différents systèmes des fonctions de nutrition** se caractérisent par des **surfaces d'échanges spécialisées** avec l'environnement (**appareil digestif** et récupération de **nutriments**, **appareil respiratoire** et récupération de **dioxygène** / évacuation de **dioxyde de carbone**, **appareil excréteur** et évacuation d'autres **déchets métaboliques**) (figure 56).
- La circulation est une **fonction intégrative** (figure 56), c'est-à-dire de **mise en relation des cellules, des organes et/ou des appareils**.
- Ses **fonctions** sont très nombreuses :
 - [Fonctions de nutrition]
 - Récupération et transport des **gaz respiratoires**,
 - Récupération et transport des **nutriments**, de l'eau et des **ions**,
 - Récupération et transport des **déchets métaboliques**,
 - [Fonctions de relation]
 - Récupération et transport des **hormones** [communication intercellulaire],
 - Récupération et transport de **molécules et cellules** maintenant l'intégrité de l'organisme [immunité, coagulation...]



Flèches vertes : les aliments ingérés deviennent nutriments suite à la digestion.
Flèches orange : déchets

▲ FIGURE 56. La Vache, un organisme constitué d'appareils spécialisés interagissant entre eux : l'exemple des fonctions de nutrition. D'après SEGARRA et al. (2014)

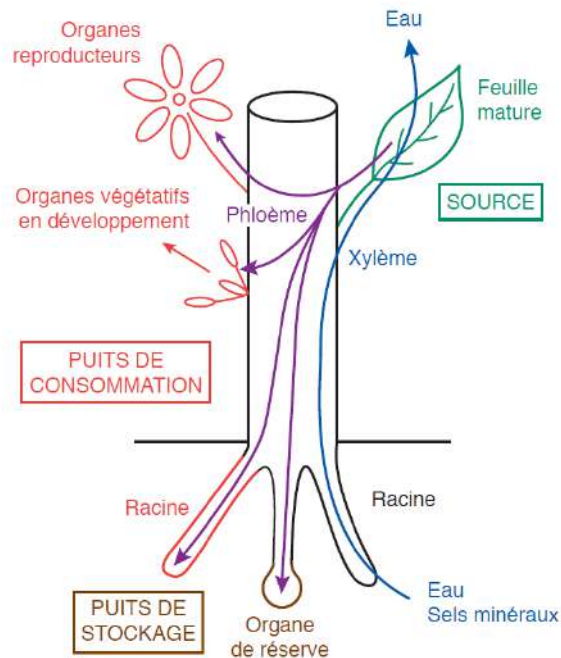
2. L'exemple de la coopération organes-sources / organes-puits chez les Angiospermes

Revoir le cours sur la Fabacée (chapitre 2) et sur la nutrition végétale (chapitre 4)

- Les **cellules végétales chlorophylliennes** sont **capables de produire leur propre matière organique à partir de matière minérale** : ce sont donc des **cellules autotrophes** ou **cellules lithotrophes**.
- Une **plante de type Angiospermes** comprend typiquement (figure 57) :
 - Des **parties chlorophylliennes**, essentiellement représentées par le **limbe des feuilles** (mais englobant aussi les **tiges et pétioles**). À la belle saison, ce sont des **organes-sources** (**organes qui libèrent de la matière organique alimentant toute la plante dans la sève élaborée**). Cela est permis parce que s'y déroule la **photosynthèse** responsable de l'autotrophie des cellules au carbone.
 - Des **parties non chlorophylliennes** : **racines, fleurs, fruits**. À la belle saison, ce sont des **organes-puits** (**organes qui prélèvent de la matière organique dans la sève élaborée**). Les cellules qui les composent sont typiquement **hétérotrophes au carbone**.

- On peut parler de **corrélations trophiques** pour désigner l'ensemble des **flux de matières nutritives** qui existent **entre les organes** d'une plante, **les racines fournissant l'eau et les sels minéraux aux organes-sources (photosynthétiques) qui à leur tour produisent et fournissent des assimilats photosynthétiques aux organes-puits**. Il y a donc une **coopération trophique** entre les organes.

Rappelons bien que **toutes les cellules végétales**, qu'elles soient **autotrophes** ou **hétérotrophes**, réalisent le **catabolisme oxydatif** (dont la **respiration cellulaire**) !



Le cas présenté est celui d'une angiosperme pendant une journée d'été. Flèche bleue : sève brute ; flèche violette : sève élaborée.

▲ FIGURE 57. **Corrélations trophiques entre organes chez une Angiosperme type (en été).**
D'après SEGARRA *et al.* (2015).

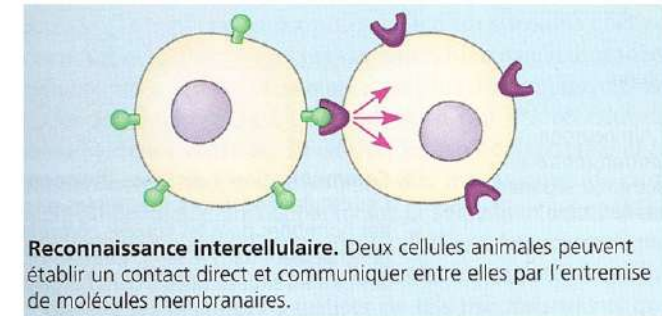
B. Une coordination de l'activité des cellules permise par des communications intercellulaires

- L'appartenance d'une cellule à un organisme pluricellulaire suppose que son **fonctionnement** soit **contrôlé** et s'inscrive, de manière **coordonnée**, dans le **fonctionnement de l'organisme entier**. Cela est permis par les **communications intercellulaires**. On appelle **communication intercellulaire** tout **mécanisme assurant le transfert d'information entre deux cellules d'un même organisme** (voire, par extension, d'organismes différents).
Je me cantonne ici à des **considérations basiques** car ce point fera l'objet d'un **développement substantiel** en BCPST2.

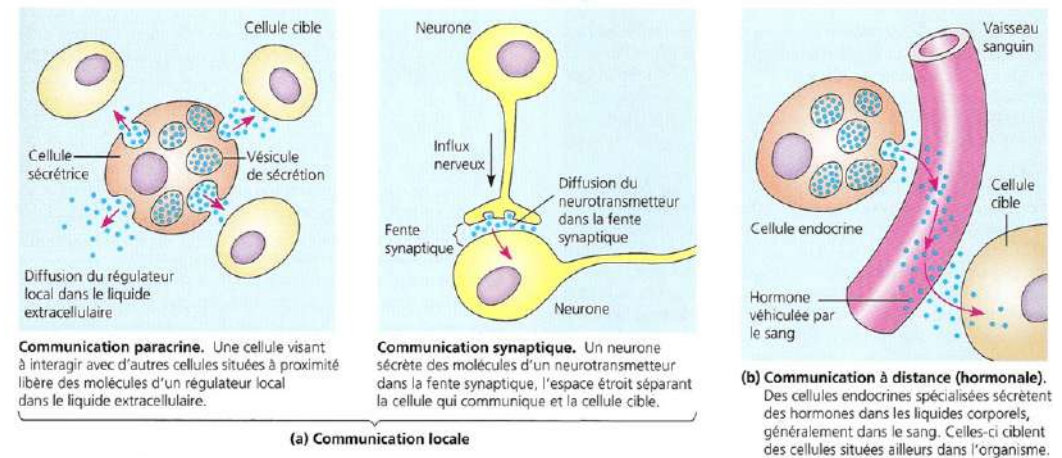
1. Dans les cellules animales

Revoir les beaux schémas que nous avons fait dans le chapitre sur la Vache

- La **figure 58** illustre et résume les **principaux types de communication intercellulaires** existant chez les **Animaux** ; ces aspects seront développés dans les parties du programme correspondantes.



Reconnaissance intercellulaire. Deux cellules animales peuvent établir un contact direct et communiquer entre elles par l'entremise de molécules membranaires.



▲ FIGURE 58. **Communication intercellulaire animales.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

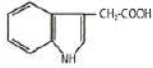
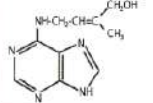
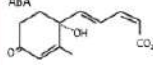
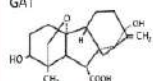
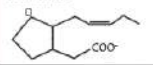
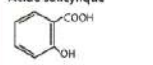
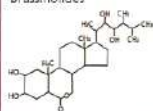
a. La juxtacrinie, communication entre cellules adjacentes

- On appelle **juxtacrinie** la **communication entre cellules adjacentes qui s'effectue par des protéines membranaires de reconnaissance (phénomène important dans le développement, les processus immunitaires...)** ou peut s'effectuer par **diffusion des molécules signaux par des jonctions gap**.

b. La paracrinie, communication à courte distance par un facteur diffusif

- On appelle **paracrinie** la **communication par émission d'un facteur diffusif avec une faible portée d'action, affectant les cellules environnantes (phénomène important dans le développement, les processus immunitaires...)**.

▼ TABLEAU VI. **Hormones végétales.** D'après MEYER *et al.* (2008).

Phytohormones	Biosynthèse et transport	Effets biologiques
Auxine (AIA : acide indolacétique) 	- Synthèse connue à partir du tryptophane, dans les feuilles jeunes, les primordiums et les graines en développement, mais d'autres voies de synthèse existent. - Transport polarisé de cellule à cellule et transport à longue distance par le phloème.	- Elongation cellulaire caulinaire - Activité cambiale - Croissance des fruits et des fleurs - Rhizogénèse (racines adventives) - Dominance apicale - Elongation cellulaire racinaire - Abscission - Floraison de certaines espèces
Cytokinines (CK) Zéatine : 	- Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C5. - Les cytokinines sont des dérivés de l'adénine (ATP) avec un groupement isoprène en position 9. - Synthèse dans les tissus jeunes ou méristématiques (apex racinaires, bourgeons, cambium, graines en développement). - Transport par le xylème.	- Croissance cellulaire des feuilles, des fruits, des bourgeons axillaires - Division cellulaire, organogénèse - Ouverture des stomates - Floraison de certaines espèces - Sénescence foliaire - Dominance apicale
Éthylène Gaz C ₂ H ₄ H ₂ C = CH ₂	- Synthétisé à partir de la méthionine dans les tissus sénescents ou soumis à un stress. - Transport par diffusion.	- Maturation des fruits - Abscission (feuille, fruit) - Sénescence (feuille, fleur) - Ouverture des fleurs - Elongation cellulaire caulinaire et racinaire
Acide abscissique (ABA) ABA 	- Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C40. - L'ABA est un sesquiterpène synthétisé à partir des caroténoïdes du plastide (voie non mévalonique) dans les feuilles matures en réponse à des stress abiotiques, les tiges, les racines, les graines et fruits en développement). - Transport par le phloème et le xylème.	- Induction et maintien de la dormance - Fermeture des stomates - Allocation des assimilats des feuilles aux graines en formation - Synthèse de protéines de réserves dans les graines - Elongation cellulaire : action antagoniste des gibbérellines
Gibbérellines Acide gibbérellique GA ₁ GA ₁ 	- Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C20. - Les GA sont des diterpènes cycliques - Synthèse dans la tige feuillée, les jeunes feuilles des bourgeons apicaux, les graines et les fruits en développement, les apex racinaires. - Transport par le xylème et le phloème.	- Croissance et élongation cellulaire de la tige feuillée (montaison) - Croissance des mutants nains - Induction de la germination de graines - Régulation de la consommation des réserves des graines de céréales - Floraison de plantes de jours longs
Jasmonate 	- Dérivé volatil d'acides gras insaturés (acide linoléique). - Synthèse dans toutes les parties de la plante.	- Synthèse de protéines de défenses - Accumulation de protéines de réserves - Croissance des tiges, des racines, Germination des graines
Systemine Petit peptide (18 AA)	Petit peptide produit dans les tissus blessés.	Défense systémique
Acide salicylique 	- Synthèse par la voie de l'acide shikimique. - L'acide salicylique est un composé phénolique.	- Activation des gènes de défense contre les agents pathogènes - Défense systémique - Croissance racinaire
Brassinostéroïdes Brassinolides 	- Synthèse par la voie des terpènes à partir d'un précurseur en C30. - Les Brassinostéroïdes sont des hormones stéroïdes. - Présent dans le pollen, les graines immatures, les feuilles, les tiges, les racines et les fleurs.	- Division et élongation cellulaires - Elongation du tube pollinique - Elongation de la tige feuillée - Morphogénèse foliaire - Production d'éthylène - Croissance et développement des racines - Différenciation vasculaire
Polyamines Spermine H ₂ N(CH ₂) ₁₀ NH(CH ₂) ₄ NH ₂ (CH ₂) ₃ NH ₂ et putrescine H ₂ N(CH ₂) ₃ NH ₂	- La spermine est formée par la voie de synthèse de l'éthylène. - La putrescine est formée par décarboxylation de l'arginine et de l'ornithine. - Présentes dans toutes les cellules. Souvent conjuguées aux acides phénoliques.	- Division cellulaire - Tubérisation - Initiation de racines et tiges adventives - Embryogénèse - Réaction d'hypersensibilité - Floraison de certaines espèces - Sénescence des tissus

- Le **codage** s'effectue en **concentration** et les cellules seront d'autant plus touchées par le **facteur diffusif** qu'elles sont **proches de la cellule émettrice**.

Certains auteurs considèrent que la **neurotransmission** est une **forme de paracrinie**.

c. L'endocrinie (communication hormonale), communication par une hormone transportée par le sang

- Il s'agit de la **communication par sécrétion endocrine d'un facteur transporté par le sang agissant à distance (hormone)**.

d. La communication nerveuse, communication par transmission d'un signal électrique par les neurones

- Il s'agit d'une **communication qui utilise comme support les neurones**. Un **message nerveux** (sous forme d'une **dépolarisation transitoire de la membrane**) se déplace le long de la **membrane plasmique** du neurone sur des distances plus ou moins importantes, parfois très longues. L'information est transmise à une autre cellule par **neurotransmission** : le **neurone libère un neurotransmetteur qui déclenche une réponse de la part de la cellule dite postsynaptique**.

2. Les hormones végétales, agents de communication chez les Embryophytes

- On appelle **hormone végétale**, **phytohormone** ou **facteur de croissance toute substance à fonction de communication intercellulaire chez les organismes végétaux**. Son transport s'effectue par **voie symplasmique**, par **voie apoplasmique** ou par les **sèves**.

Le terme d'**hormone** est parfois considéré comme **abusif** puisque, chez les Métazoaires, celui-ci fait référence à un **transport sanguin**.

- En anticipation sur d'autres chapitres, le **tableau VI** présente les **principales hormones des Angiospermes**.

C. Une possibilité de certaines cellules eucaryotes d'interagir, par échanges de matière et d'information, avec des micro-organismes

- Le **programme** invite à montrer que l'**organisme eucaryote** peut interagir – par échange de matière et d'information – avec **d'autres organismes**, en se limitant à des **Bactéries** précises : **Escherichia coli** dans l'**intestin mammalien** ou **Rhizobium sp.** au niveau des **racines de Fabacées**.
- Cela ne doit pas faire oublier que de nombreuses autres **interactions interspécifiques** sont abordées par le **programme**.

1. L'exemple de l'interaction entre épithélium intestinal des Mammifères et microbiote intestinal (cas d'Escherichia coli)

- L'étude du **microbiote intestinal**, dont les **dysbioses** seraient à l'origine de **pathologies (encadré C)**, est un **sujet d'actualité et d'avenir**, notamment chez l'**espèce humaine** mais aussi les autres **espèces animales d'intérêt agronomique ou vétérinaire**. On commence à peine à entrevoir la **complexité des échanges** en jeu (**figure 59**).

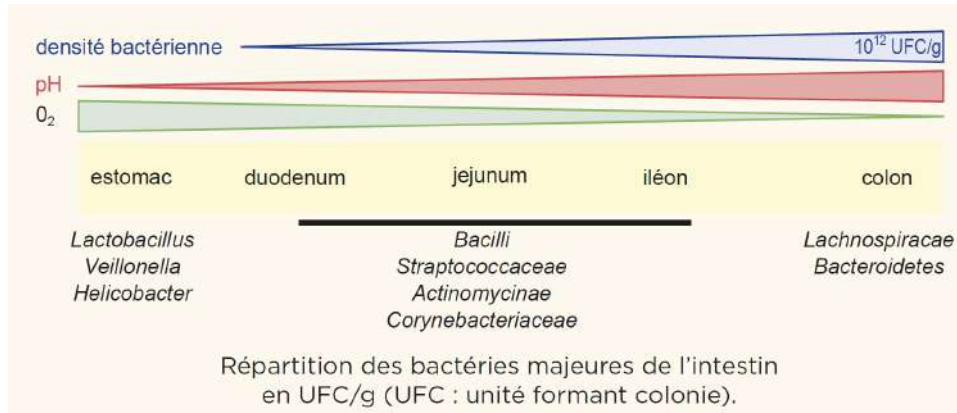
Encadré C Le microbiote intestinal (chez l'homme)

La notion de microbiote, holobionte, eubiose, dysbiose

- On appelle **microbiote** l'ensemble des micro-organismes [microbes] (Bactéries, 'champignons', Archées, parfois unicellulaires eucaryotes...) – en incluant ou non les virus, selon les auteurs – qui vivent dans les cavités internes ou sur les surfaces, internes ou externes d'un organisme macroscopique [macro] d'une autre espèce, nommé **hôte**.
- Ces microbes peuvent entretenir des relations variées avec l'hôte : symbiose, commensalisme, pathogénicité...
- Il évolue tout au long de la vie, à la fois en fonction des caractéristiques microbiologiques (diversité microbienne, effectifs des populations microbiennes...) de l'environnement, de l'état physiologique des organismes impliqués (microbes et macrobe) et du patrimoine génétique de ces organismes (microbes et macrobe).
- On parle d'**holobionte** pour désigner conjointement un hôte et son microbiote.
- Le plus souvent, l'hôte et le microbiote souvent diversifié qu'il héberge sont dans un état équilibré compatible avec un fonctionnement normal de l'hôte : on parle d'**eubiose**. Si la diversité des organismes au sein du microbiote diminue et/ou certaines populations microbiennes prolifèrent excessivement au détriment d'autres, un déséquilibre – souvent pathogène pour l'hôte – s'installe, c'est la **dysbiose**.

Diversité bactérienne dans l'intestin

- Le microbiote de l'intestin est parfois aussi appelé **flore intestinale**. Ce microbiote est important dans l'intestin grêle et présente un effectif d'individus par unité de masse encore supérieure dans le gros intestin (figure a).



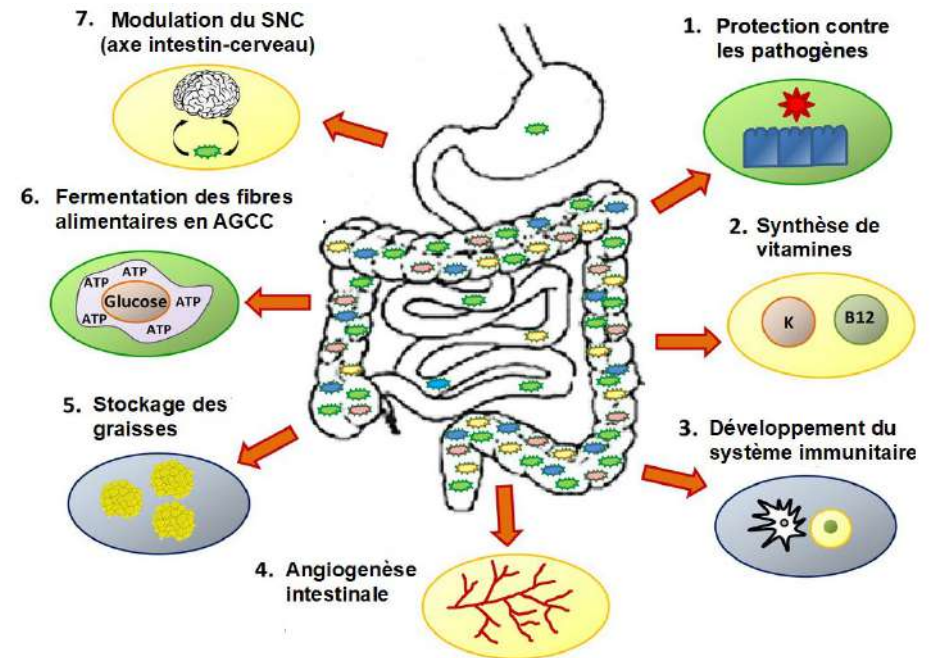
▲ FIGURE a. Le microbiote bactérien intestinal humain : répartition et effectif.
D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021)

- Pour ne citer que les Bactéries de la flore intestinale humaine, on connaît plus de 1000 espèces bactériennes mais toutes ne se retrouvent pas dans un individu donné. Des cortèges d'espèces associées typiques qui diffèrent selon les individus, vraisemblablement largement explicables par l'alimentation : on appelle **entérotypes** ces cortèges d'espèces. On dit aussi que leur masse représente jusqu'à 1 kg !

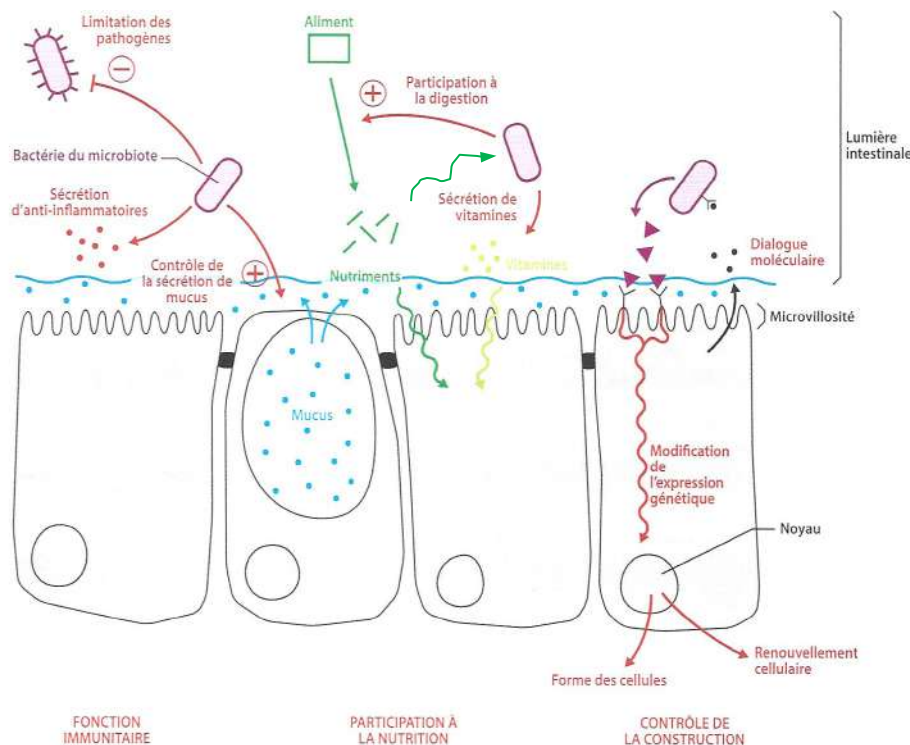
- Pour identifier ces Bactéries, on peut les identifier par des techniques patientes et classiques de mise en culture puis identification par kits enzymatiques et/ou séquençage... mais l'on utilise de plus en plus la **métagénomique** : il s'agit d'une amplification et d'un séquençage à grande échelle de l'ADN présent dans un écosystème donné qui conduit à identifier rapidement de nombreuses espèces – voire à en détecter de nouvelles sans même les avoir observées !

Quelques intérêts fonctionnels du microbiote intestinal

- Le microbiote intestinal semble agir sur :
 - l'immunité qu'il stimule ou inhibe selon les cas, protégeant par ailleurs d'une prolifération des populations pathogènes grâce à l'équilibre entre espèces variées qu'il constitue ;
 - l'organisation histologique de l'intestin (épaisseur et taux de renouvellement de l'épithélium intestinal ; vascularisation...);
 - le fonctionnement du système nerveux (avec même des suspicions d'autisme, dépression, schizophrénie, retard de développement cérébral, anxiété... que pourraient engendrer certaines dysbioses),
 - la digestion qu'il facilite par sa propre activité enzymatique, notamment celles des fibres alimentaires (même l'homme pourrait ainsi voir un peu la cellulose digérée... et des auteurs suggèrent qu'il pourrait métaboliser des acides gras volatils dans le foie et/ou que l'organisme les utiliserait comme signaux contrôlant sa propre activité, allant jusqu'à provoquer de l'obésité en cas de dysbiose...).
 - la synthèse de vitamines ou d'acides aminés essentiels ;
 - ...



▲ FIGURE b. Le microbiote bactérien intestinal humain : impact physiologique.
AGCC = acides gras à chaîne courte (= acides gras volatils AGV). D'après Wikipédia



▲ FIGURE 59. Interaction microbiote / épithélium intestinal (partiel).
D'après DAUTEL *et al.* (2021), légèrement amendé.

a. Des échanges d'information entre hôte et Bactéries

- Les **constituants bactériens** et divers **métabolites** déclenchent dans l'intestin mammalien (figure 59) :
 - Une **modification de l'expression génétique**, notamment au niveau :
 - Des **cellules progénitrices**, stimulant le **renouvellement cellulaire** ;
 - Des **cellules souches vasculaires**, modulant l'**organisation des vaisseaux** ;
 - Des **entérocytes**, entretenant les **constituants des jonctions serrées**, ce qui **limite les flux paracellulaires**, et notamment la possible **insinuation** des microbes dans le fluide interstitiel (soit son entrée dans l'organisme).
 - Une **modification de l'activité sécrétoire** des cellules (qui passe également par l'expression génétique), notamment :
 - Des **cellules à mucus**, produisant **davantage de mucus**, ce qui **entrave l'adhésion des Bactéries** à l'épithélium,
 - Des **cellules de Paneth**, sécrétant davantage de **peptides antimicrobiens** détruisant les **Bactéries** ;
 - Des **cellules immunitaires** libérant des **anticorps anti-microbiens** ... qui néanmoins sont **contrebalancés par les anti-inflammatoires** que les **Bactéries libèrent** avec pour fonction de **moduler l'action du système immunitaire**.

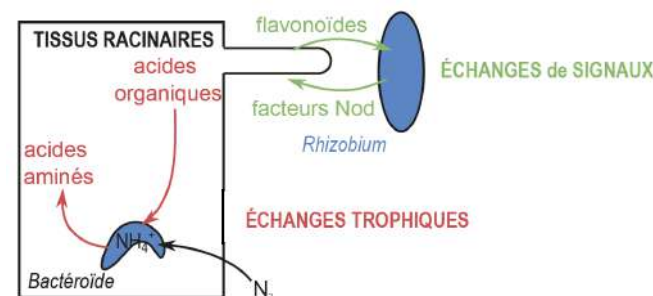
- Notons qu'un **bon équilibre bactérien** (**eubiose** ; voir **encadré C**) garantit que les **Bactéries pathogènes** voient leur **effectif « contrôlé »** par **d'autres populations bactériennes**.

b. Des échanges de matière entre hôte et Bactéries

- Le **microbiote** récupère dans la **lumière intestinale** :
 - Des **nutriments déjà digérés, ou digérables**, et **apportés** par l'**organisme hôte** ;
 - Des **facteurs de croissance** produits par l'**hôte** ou les **autres espèces microbiennes**.
- L'**organisme hôte** récupère du **microbiote** :
 - Des **vitamines synthétisées** par les **Bactéries** ;
 - Des **acides gras volatils** (digérés à partir de **cellulose** par exemple par des **exoenzymes** bactériennes) dont des travaux suggèrent qu'ils sont **métabolisés par le foie** ;
 - Des **acides aminés essentiels synthétisés** par les **Bactéries** et/ou issus des **digestions microbiennes** (par des **exoenzymes bactériennes**).

2. L'exemple de l'interaction entre racines des Fabacées et micro-organismes de la rhizosphère (cas de *Rhizobium*)

- Les **micro-organismes interagissant** avec la **rhizosphère** sont **nombreux** et ont été approchés dans le **chapitre 2 sur la Fabacée**. On se limite à reprendre quelques éléments de l'**interaction *Rhizobium*-Fabacée** (figure 60).



▲ FIGURE 59. Les échanges informationnels et trophiques entre *Rhizobium* et Fabacée : une vision très simplifiée. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2004).

Une vision plus complète est donnée dans le **chapitre 2 (Fabacée)**

a. Des échanges d'information lors de la nodulation

- Lors de la **nodulation** (**mise en place de la nodosité**), rappelons qu'un **dialogue moléculaire** entre **protagonistes de l'interaction**, initialement **séparés**, est observable :
 - La **Fabacée**, en cas de **stress azoté** (manque de **nitrate** dans le sol) produit des **composés attracteurs** (ex. **flavonoïdes**, **bétaïnes**) qui attirent les **Bactéries *Rhizobium* flagellées** vivant dans le sol.
 - En réponse à ces composés, les **Bactéries s'approchent** et **libèrent des facteurs Nod** qui, à leur tour...
 - ... **stimulent les gènes de nodulines** à l'origine de l'**édification** puis du **fonctionnement de la nodosité**.

b. Des échanges de matière entre les protagonistes au sein des nodosités

- Au sein de l'interaction,
 - L'autotrophie à l'azote est majoritairement assurée par le bactéroïde, diazotrophe (même si l'assimilation réductrice des nitrates par la Fabacée demeure active).
 - L'autotrophie au carbone est totalement assurée par la Fabacée, photosynthétique.
- Les principaux échanges trophiques sont les suivants :
 - Les cellules racinaires récupèrent des ions ammonium (qu'elles convertissent ensuite en acides aminés) voire des acides aminés déjà produits par la Bactérie.
 - Les bactéroïdes récupèrent des sucres ou des acides organiques (carbonés) de la cellule racinaire.

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

Le plan ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un outil d'apprentissage et de structuration des concepts importants. Vous pouvez en recopier les grandes lignes ou annexer le plan du polycopié directement.

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

- Niveaux de structures, microscopie

° Entérocyte et flux associés (>> précisé dans les chapitres 6 et 7)

° Cellule chlorophyllienne et flux associés (>> précisés dans le chapitre 6)

° Niveaux d'organisation du vivant

° Épithélium intestinal avec la diversité des cellules, leurs fonctions et les principaux flux à ajouter

° Coupe transversale de feuille avec les flux principaux

° Paroi de l'intestin simplifiée (s'inspirer de la figure 13)

+ bien revoir le TP SV C pour maîtriser les coupes histologiques.

° Organismes entiers

° Quelques ordres de grandeurs biologiques

° Tableau comparant les techniques d'observation

+ bien revoir le complément du TP SV C pour comprendre les techniques.

- Cohésion tissulaire, matrices extracellulaires

° Jonctions (toutes)

° Épithélium / conjonctif

° Matrice animale (modèle moléculaire architectural)

° Os

° Matrice végétale (= paroi pectocellulosique) (modèle moléculaire architectural)

° Cytodiérèse végétale

° Cellulose-synthase

° Épaississement de lignine

° Vaisseau de xylème

° Tableau des fonctions principales des matrices

° Plasmodesme

+ bien revoir le chapitre 8 pour savoir schématiser chaque constituant matriciel et en décrire la relation structure-fonction.

+ bien revoir l'histologie animale et l'histologie végétale.

- Intégration fonctionnelle des cellules

° Fonctions de nutrition chez la Vache

° Corrélations trophiques chez une Angiosperme

° Communications intercellulaires animales (typologie)

° Interactions entre Bactéries intestinales et épithélium intestinal

° Interactions entre Rhizobium et Fabacée

Bilan (adapté du programme)

✓ Certaines cellules d'un organisme pluricellulaire eucaryote interagissent (échanges de matière et d'information) avec d'autres organismes.

Références

- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2004). *Biologie moléculaire de la cellule. Quatrième édition*. Flammarion, Paris. Traduction de la quatrième édition américaine (2002) par F. LE SUEUR-ALMOSNI. Première édition américaine 1983 (1986 1^{re} édition française).
- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2008). *Molecular Biology of the Cell. Fifth Edition*. 1st edition 1983. Garland Science, New York (NY), USA & Abingdon, UK.
- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, D. MORGAN, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2015). *Molecular Biology of the Cell. Sixth Edition*. 1st edition 1983. Garland Science, New York (NY), USA & Abingdon, UK.
- ALBERTS, B., D. BRAY, K. HOPKIN, A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2014). *Essential Cell Biology. Fourth Edition*. 1st edition 1998. Garland Science, New York (NY), USA & Abingdon, UK.
- BERTHET, J. (2006). *Dictionnaire de Biologie*. De Boeck Université, Bruxelles (Belgique).
- BOUJARD, D. (dir.). B. ANSELME, C. CULLIN & C. RAGUÉNÈS-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES*. 2^e édition (1^{re} édition 2012), Dunod, Paris.
- BREUIL, M. (2007). *Biologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- BREUIL, M. (2009). *Biologie 2^e année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- BRINGMANN, M., B. LANDREIN, C. SCHUDOMA, O. HAMANT, M.-T. HAUSER & S. PERSSON (2012). Cracking the elusive alignment hypothesis: the microtubule–cellulose synthase nexus unraveled. *Trends in Plant Science*, **17** (11) : 666-674. <https://doi.org/10.1016%2Fj.tplants.2012.06.003>
- BUCHANAN, B. B., W. GRUISSEM & R. L. JONES (dir.) (2015). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Wiley, New York, USA – Blackwell, Oxford, UK, 2e edition (1e edition 2002).
- CALLEN, J.-C. (2005). *Biologie cellulaire. Des molécules aux organismes*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 1999).
- CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie*. De Boeck Université, Bruxelles, 2^e édition (1^{re} édition 1995).
- [CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERMAN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie*. Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÎNE. Pearson, Paris (4e édition).
- COOPER, G. M. (2019). *Cell. A Molecular Approach*. 8th edition, Sinauer / Oxford University Press, Oxford (GB).
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{re} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), C. BORDI, F. SAINTPIERRE, M. ALGRAIN-PITAVY, M. QUERTINIEZ, A. PROUST, M. VABRE A. HELME-GUIZON & B. MOLLIER (2019). *Biologie Géologie BCPST 2^e année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{re} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DENÈUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- EDELBLUM, K. L. & J. R. TURNER (2015). Epithelial Cells: Structure, Transport, and Barrier Function. Pp. 187-210. In: J. MESTECKY, W. STROBER, M. W. RUSSEL, B. L. KELSALL, H. CHEROUTRE & B. N. LAMBRECHT (dir.). *Mucosal Immunology*. Fourth edition. Elsevier, Amsterdam, 2247 pp.
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- LAFON, C. (2003). *La biologie autrement. 100 questions de synthèse*. Ellipses, Paris.
- LATRUFFE, N. (dir.), F. BLEICHER-BARDETTI, B. DUCLOS & J. VAMECQ (2014). *Biochimie. Tout le cours en fiches. Licence. PACES-UE1. CAPES*. Dunod, Paris.
- LELIÈVRE, É., J. DENÈUD, J. ROQUES, É. HAMARD-PÉRON & M. AIRAUD (2018). *Biologie*. Dunod, Paris.
- MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2004).
- MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et collaborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie*. Frison-Roche, Paris.
- PÉRILLEUX, É., D. RICHARD, B. ANSELME, J.-M. DEMONT & P. VALET (2002). *Biologie humaine. Anatomie, physiologie, santé*. Nathan, Paris, 2^e édition.
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEIOIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOHRLE (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Malakoff (F).
- PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010a). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 2^e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1^{re} édition 2006).
- PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010b). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2007).
- PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2013). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2006).
- PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2007).
- PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2017). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 4^e édition (1^{re} édition 2006).
- PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2018). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2007).
- PORTER, K. R. & M. A. BONNEVILLE (1973). *Structure fine des cellules et des tissus*. 2^e édition française (1^{re} édition 1969). Traduction de la troisième édition américaine (1968) par C. FAVARD-SÉRÉNO sous la direction de P. FAVARD. Ediscience, Paris, 196 pages.
- RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007). *Biologie*. De Boeck, Bruxelles.
- RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2012). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2010).
- SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, A. DENIS, L. GERAY & I. MOLLIÈRE (2021). *Mémento Biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2017).
- SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1^{re} année*. Ellipses, Paris.
- SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2^e année*. Ellipses, Paris.
- TAIZ, L. & E. ZEIGER (dir.) (2010). *Plant physiology*. Sinauer Associates, Sunderland (Massachusetts, USA), 5^e édition (1^{re} édition 1991).
- VIGNAIS, P. (2001). *La Biologie des origines à nos jours. Une Histoire des idées et des hommes*. « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.
- VIGNAIS, P. (2006). *Science expérimentale et connaissance du Vivant. La Méthode et les concepts*. « Grenoble Sciences », EDP Sciences, Les Ulis.
- SILVERTHORN, D. U., avec W. C. OBER, C. W. GARRISON, A. C. SILVERTHORN & B. R. JOHNSON (2007). *Physiologie humaine. Une approche intégrée*. Pearson Education France, Paris, 4^e édition américaine traduite sous la dir. de J.-F. BRUN.
- [VANDER, A. J.], E. P. WIDMAIER, H. RAFF & K. T. STRANG (2013). *Physiologie humaine. Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme*. Maloine, Paris, 6^e édition.

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale sur la cellule	2
I. Des cellules spécialisées qui s'intègrent structuralement et fonctionnellement dans un organisme et que l'on peut étudier par des techniques de microscopie	3
A. Les cellules dans les organismes pluricellulaires, des entités spécialisées	3
1. La spécialisation cellulaire, une donnée structurale et fonctionnelle	4
a. L'exemple de l'entérocyte : une cellule animale mammalienne polarisée spécialisée dans l'absorption intestinale	4
b. L'exemple de la cellule du parenchyme palissadique (CPP) foliaire : une cellule végétale d'Angiospermes Eudicotylédones spécialisée dans la photosynthèse	5
2. La spécialisation cellulaire, fruit d'un processus de différenciation	5
B. L'intégration des cellules dans des tissus, des organes, des systèmes ou appareils et des organismes	5
1. Rappels : les différents niveaux d'organisation du vivant	5
2. Des cellules associées dans un tissu, ensemble homogène de cellules	7
a. L'entérocyte, un type cellulaire majoritaire dans un épithélium au sein d'une muqueuse	7
α. Un épithélium dans une muqueuse repliée (villosités, cryptes de Lieberkühn) et vascularisée	7
β. Un épithélium unistratifié et prismatique, à fonction de revêtement et d'absorption (+ sécrétion)	8
γ. Un épithélium comprenant des types cellulaires variés	8
b. La CPP, cellule constitutive du parenchyme palissadique, partie supérieure du parenchyme assimilateur foliaire à méats étroits	9
3. Des tissus insérés dans des organes, ensembles de tissus coopérant localement dans la réalisation d'une ou plusieurs fonctions	10
a. L'entérocyte : une cellule animale insérée dans l'intestin grêle de Mammifères	10
b. La cellule du parenchyme palissadique : une cellule végétale insérée dans la feuille des Angiospermes 'dicotylédones'	11
4. Des organes s'intégrant dans des systèmes ou appareils, s'intégrant eux-mêmes dans des organismes	12
a. L'intestin grêle, organe de l'appareil digestif présent chez un Mammifère	12
b. La feuille, organe de l'appareil végétatif aérien présent chez une Angiosperme	12
5. Bilan	12
6. Discussion : la possibilité d'une pluricellularité chez certains procaryotes ?	13
C. La connaissance des cellules et des tissus permise par des techniques d'observation microscopique	14
II. Une cohésion des tissus assurée par la matrice extracellulaire et/ou des jonctions cellulaires	15
A. Les jonctions cellulaires, des édifices protéiques associant certaines cellules animales entre elles (ou à la matrice extracellulaire)	15
1. La cohésion tissulaire, une coopération cytosquelette – jonctions – matrice dans certains tissus animaux, notamment les tissus épithéliaux	15
2. Les principales jonctions cellule-cellule d'un tissu épithélial	16
a. Les jonctions serrées, des jonctions limitant les flux paracellulaires	16
b. Les jonctions d'ancrage (<i>anchoring junctions</i>), des jonctions s'associant fermement au cytosquelette et arrimant les cellules entre elles par des cadhérines	17
α. En lien avec une dense ceinture de microfilaments d'actine : les ceintures d'adhérence (jonctions adhérentes)	17
β. En lien avec des filaments intermédiaires (typiquement de kératine) : les desmosomes	17

c. Les jonctions communicantes (jonctions <i>gap</i>), un ensemble de tunnels à canal hydrophile peu sélectif assurant une continuité des cytosols des cellules adjacentes	18
3. Des jonctions d'ancrage à la matrice extracellulaire : les hémidesmosomes (et les contacts focaux, plus rares dans les épithéliums)	19
4. Existence d'adhésions transitoires, notamment impliquées dans les communications intercellulaires et le développement	20
B. Les matrices extracellulaires, des complexes extracellulaires aqueux, fibreux et gélifiés, associant les cellules entre elles	20
1. Notion de matrice extracellulaire	20
2. Les matrices extracellulaires animales (MECA)	20
a. Préalable : rappel de la différence entre épithélium et tissu conjonctif en lien avec la matrice	20
b. Constitution et organisation des matrices extracellulaires animales typiques (matrices des jonctionnels au sens strict et lame basale)	21
c. Des matrices extracellulaires animales dont les constituants sont produits et exocytés par des fibroblastes	22
d. Des matrices animales pouvant subir une imprégnation minérale : exemple de l'os	23
3. La paroi, matrice extracellulaire végétale à rôle squelettique	23
a. Un rôle squelettique, cohésif, dans les échanges (<i>via</i> l'apoplasme) et dans le développement	23
b. Composition et organisation de la paroi primaire	23
c. Synthèse et mise en place des constituants pariétaux	24
α. Mise en place précoce : édification du phragmoplaste par fusion de vésicules golgiennes pectiques et hémicellulosiques	24
β. La mise en place des celluloses : un processus membranaire	24
i. Une mise en place à partir d'UDP-glucose assurée par les celluloses synthases	24
ii. Une mise en place guidée par les microtubules corticaux	25
γ. Apport des constituants non celluloseux aux parois par exocytose	25
δ. Une paroi primaire qui peut autoriser l'élongation	26
d. Mise en place de la paroi secondaire, une paroi inextensible et différenciée	27
α. Notions de paroi primaire et paroi secondaire	27
β. Une différenciation de la paroi en paroi secondaire qui repose sur deux processus	28
i. L'épaississement pariétal par ajout de couches de cellulose	28
ii. La modification de la composition pariétale par imprégnation de molécules variées (lignines, subérines, cutines)	28
4. Comparaison des matrices extracellulaires animales et végétales	29
C. La possibilité d'un continuum cytoplasmique entre cellules adjacentes	31
1. Un continuum permis par les jonctions <i>gap</i> chez les Animaux et les plasmodesmes chez les végétaux	31
2. Focus sur les plasmodesmes végétaux ; notion de symplasme	31
3. Conséquence fonctionnelle : la circulation de matière (particules de taille modérée) et d'information	31
III. Des cellules qui coopèrent, dont l'activité est coordonnée et qui peuvent interagir avec d'autres organismes	32
A. Une coopération des cellules / tissus / organes spécialisés au sein de l'organisme	32
1. Chez les Métazoaires : l'exemple de la coopération entre fonctions de nutrition	32
2. L'exemple de la coopération organes-sources / organes-puits chez les Angiospermes	32
B. Une coordination de l'activité des cellules permise par des communications intercellulaires	33
1. Dans les cellules animales	33
a. La juxtacrinie, communication entre cellules adjacentes	33
b. La paracrinie, communication à courte distance par un facteur diffusif	33

c. L'endocrinie (communication hormonale), communication par une hormone transportée par le sang	34
d. La communication nerveuse, communication par transmission d'un signal électrique par les neurones	34
2. Les hormones végétales, agents de communication chez les Embryophytes	34
C. Une possibilité de certaines cellules eucaryotes d'interagir, par échanges de matière et d'information, avec des micro-organismes	34
1. L'exemple de l'interaction entre épithélium intestinal des Mammifères et microbiote intestinal (cas d' <i>Escherichia coli</i>)	34
a. Des échanges d'information entre hôte et Bactéries	36
b. Des échanges de matière entre hôte et Bactéries	36
2. L'exemple de l'interaction entre racines des Fabacées et micro-organismes de la rhizosphère (cas de <i>Rhizobium</i>)	36
a. Des échanges d'information lors de la nodulation	36
b. Des échanges de matière entre les protagonistes au sein des nodosités	37
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	37
Références	38
Plan du chapitre	39
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan)	40
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux de plan)	41

Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan)

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale sur la cellule	2
I. Des cellules spécialisées qui s'intègrent structuralement et fonctionnellement dans un organisme et que l'on peut étudier par des techniques de microscopie	3
A. Les cellules dans les organismes pluricellulaires, des entités spécialisées	3
1. La spécialisation cellulaire, une donnée structurale et fonctionnelle	4
2. La spécialisation cellulaire, fruit d'un processus de différenciation	5
B. L'intégration des cellules dans des tissus, des organes, des systèmes ou appareils et des organismes	5
1. Rappels : les différents niveaux d'organisation du vivant	5
2. Des cellules associées dans un tissu, ensemble homogène de cellules	7
3. Des tissus insérés dans des organes, ensembles de tissus coopérant localement dans la réalisation d'une ou plusieurs fonctions	10
4. Des organes s'intégrant dans des systèmes ou appareils, s'intégrant eux-mêmes dans des organismes	12
5. Bilan	12
6. Discussion : la possibilité d'une pluricellularité chez certains procaryotes ?	13
C. La connaissance des cellules et des tissus permise par des techniques d'observation microscopique	14
II. Une cohésion des tissus assurée par la matrice extracellulaire et/ou des jonctions cellulaires	15
A. Les jonctions cellulaires, des édifices protéiques associant certaines cellules animales entre elles (ou à la matrice extracellulaire)	15
1. La cohésion tissulaire, une coopération cytosquelette – jonctions – matrice dans certains tissus animaux, notamment les tissus épithéliaux	15
2. Les principales jonctions cellule-cellule d'un tissu épithélial	16
3. Des jonctions d'ancrage à la matrice extracellulaire : les hémidesmosomes (et les contacts focaux, plus rares dans les épithéliums)	19
4. Existence d'adhésions transitoires, notamment impliquées dans les communications intercellulaires et le développement	20
B. Les matrices extracellulaires, des complexes extracellulaires aqueux, fibreux et gélifiés, associant les cellules entre elles	20
1. Notion de matrice extracellulaire	20
2. Les matrices extracellulaires animales (MECA)	20
3. La paroi, matrice extracellulaire végétale à rôle squelettique	23
4. Comparaison des matrices extracellulaires animales et végétales	29
C. La possibilité d'un continuum cytoplasmique entre cellules adjacentes	31
1. Un continuum permis par les jonctions <i>gap</i> chez les Animaux et les plasmodesmes chez les végétaux	31
2. Focus sur les plasmodesmes végétaux ; notion de symplasma	31
3. Conséquence fonctionnelle : la circulation de matière (particules de taille modérée) et d'information	31
III. Des cellules qui coopèrent, dont l'activité est coordonnée et qui peuvent interagir avec d'autres organismes	32
A. Une coopération des cellules / tissus / organes spécialisés au sein de l'organisme	32
1. Chez les Métazoaires : l'exemple de la coopération entre fonctions de nutrition	32
2. L'exemple de la coopération organes-sources / organes-puits chez les Angiospermes	32

B. Une coordination de l'activité des cellules permise par des communications intercellulaires	33
1. Dans les cellules animales	33
2. Les hormones végétales, agents de communication chez les Embryophytes	34
C. Une possibilité de certaines cellules eucaryotes d'interagir, par échanges de matière et d'information, avec des micro-organismes	34
1. L'exemple de l'interaction entre épithélium intestinal des Mammifères et microbiote intestinal (cas d' <i>Escherichia coli</i>)	34
2. L'exemple de l'interaction entre racines des Fabacées et micro-organismes de la rhizosphère (cas de <i>Rhizobium</i>)	36
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	37
Références	38
Plan du chapitre	39
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan)	40
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux de plan)	41

Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux de plan)

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale sur la cellule	2
I. Des cellules spécialisées qui s'intègrent structuralement et fonctionnellement dans un organisme et que l'on peut étudier par des techniques de microscopie	3
A. Les cellules dans les organismes pluricellulaires, des entités spécialisées	3
B. L'intégration des cellules dans des tissus, des organes, des systèmes ou appareils et des organismes	5
C. La connaissance des cellules et des tissus permise par des techniques d'observation microscopique	14
II. Une cohésion des tissus assurée par la matrice extracellulaire et/ou des jonctions cellulaires	15
A. Les jonctions cellulaires, des édifices protéiques associant certaines cellules animales entre elles (ou à la matrice extracellulaire)	15
B. Les matrices extracellulaires, des complexes extracellulaires aqueux, fibreux et gélifiés, associant les cellules entre elles	20
C. La possibilité d'un continuum cytoplasmique entre cellules adjacentes	31
III. Des cellules qui coopèrent, dont l'activité est coordonnée et qui peuvent interagir avec d'autres organismes	32
A. Une coopération des cellules / tissus / organes spécialisés au sein de l'organisme	32
B. Une coordination de l'activité des cellules permise par des communications intercellulaires	33
C. Une possibilité de certaines cellules eucaryotes d'interagir, par échanges de matière et d'information, avec des micro-organismes	34
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	37
Références	38
Plan du chapitre	39
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux de plan)	40
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux de plan)	41

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en décembre 2021 • Dernière actualisation : octobre 2025.
Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com
Adresse de téléchargement : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>



Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.