République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA STAMBOULI de Mascara

Faculté des Sciences et de la Nature et de la Vie



Polycopié de Cours

BIOLOGIE VEGETALE

Présenté par : Dr. KOUADRI Mohammed Elamine

Ce cours est destiné aux étudiants de première année tronc commun

Domaine

Sciences de la Nature et de la Vie

1ère année Tronc commun

Semestre : 2ème Semestre

UE : Unité d'Enseignement Fondamentale

Matière : Biologie Végétale

Semestre : 2

Unité d'enseignement : UEF 2.1

Code : F 2.1.2

Volume horaire par semaine :

Cours : 1h30

TP : 3h

Crédits : 6

Coefficient : 3

Mode d'évaluation : Contrôle continu : 40%

Examen : 60%

Objectifs de l'enseignement

L'objectif de cette matière est d'inculquer aux étudiants les principes fondamentaux de l'organisation tissulaire des plantes, et de leurs développements.

Connaissances préalables recommandées :

L'étudiant doit avoir certaines notions sur les différentes parties d'un végétal

Contenu de la matière :

- Introduction
- Chapitre 1 : l'organisation cellulaire des végétaux
- Chapitre 2 : Les différents types de tissus végétaux
- Chapitre 3 : Anatomie et morphologie des organes végétaux
- Chapitre 4 : La reproduction chez les Angiospermes

Table des matières

INTRODUCTION 1

RELATION ENTRE L'ÊTRE HUMAIN ET LA PLANTE 1
CLASSIFICATION DES VÉGÉTAUX 1

CHAPITRE 1 : L'ORGANISATION CELLULAIRE DES VÉGÉTAUX 4

1.1. PAROI CELLULAIRE 4
1.2. MEMBRANE PLASMIQUE 5
1.3. LE NOYAU 6
1.4. LE RÉTICULUM ENDOPLASMIQUE 7
1.5. RIBOSOMES 8
1.6. DICTYOSOMES 9
1.7. PLASTES 9
1.8. MITOCHONDRIE 12
1.9. VACUOLE 12
1.10. CYTOSQUELETTE 14
2. REPRODUCTION CELLULAIRE 15

CHAPITRE 2 : LES DIFFÉRENTS TYPE DE TISSUS VEGETAUX 18

1.TISSUS MÉRISTÉMATIQUES 18
2.TISSU DE REMPLISSAGE (PARENCHYME) 24
3. TISSUS DE REVÊTEMENT (PROTECTION) 28
4. TISSUS DE SÉCRÉTION 32
5. TISSUS CONDUCTEURS 35
6. TISSU DE SOUTIEN 40

CHAPITRE 3 : ANATOMIE ET MORPHOLOGIE DES ORGANES VÉGÉTAUX44

1. RACINE 44
1.1. FONCTIONS FONDAMENTALES ET MORPHOLOGIE DES RACINES 44
1.2. DIVERSITÉ DES SYSTÈMES RACINAIRES, CROISSANCE ET ADAPTATIONS CHEZ LES MONOCOTYLÉDONES ET DICOTYLÉDONES 46
1.3. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES RACINES 48
A) LA COIFFE RACINAIRE 48
B) ZONE DE DIVISION CELLULAIRE : LE MÉRISTÈME APICAL 49
C) ZONE D'ÉLONGATION 50
D) ZONE DE MATURATION ET POILS ABSORBANTS 50
1.4. LE CORTEX 51
1.5. LE CYLINDRE CENTRAL 52
1.6. CROISSANCE SECONDAIRE ET PROTECTION 53
1.7. FORMATION DES RACINES LATÉRALES (SECONDAIRES) 54

TIGE **55**

1. FORME EXTERNE D'UN RAMEAU LIGNEUX 55
2. ORIGINE ET DÉVELOPPEMENT DES TIGES 57
3. SCHÉMAS TISSULAIRES DANS LES TIGES 59
A) STÈLES 59
B) TIGES HERBACÉES DICOTYLÉDONES 59
C) TIGES LIGNEUSES DICOTYLÉDONES 60
D) TIGES MONOCOTYLÉDONES 63

FEUILLES **68**

1. STRUCTURE DES FEUILLES 68
2. DISPOSITION DES NERVURES (NERVATION) 69
3. DIVERSITÉ DES FORMES ET TEXTURES DES FEUILLES 70
4.1. EPIDERME 73
4.2. MÉSOPHYLLE 74
4.3. TISSUS VASCULAIRES 76

FLEURS **79**

1. STRUCTURE D'UNE FLEUR 79
1.1. LE PÉRIANTHE 80
1.2. LES PIECES FERTILES 81
L'ANDROCÉE 81
LE GYNÉCÉE 82
1.3. DISPOSITION DE L'OVAIRE ET DES PIÈCES FLORALES 82

FRUITS **84**

1. RÉGIONS DES FRUITS 84
2. LES DIFFÉRENTS TYPES DE FRUITS 85

GRAINES **91**

1. STRUCTURE DES GRAINES 91
2. GERMINATION 93

CHAPITRE 4 : LA REPRODUCTION CHEZ LES ANGIOSPERMES **95**

GAMÉTOGENÈSE **95**

1. LA GAMÉTOGENÈSE MÂLE OU MICROGAMÉTOGENÈSE 95
2. LA GAMÉTOGENÈSE FEMELLE OU MÉGAGAMÉTOGENÈSE 97

FÉCONDATION **100**

1. LA POLLINISATION : TRANSFERT DES GAMÈTES MÂLES 100
2. GERMINATION DU POLLEN : DU STIGMATE À L'OVULE 102
3. LA DOUBLE FÉCONDATION : UN PROCESSUS UNIQUE 102

Listes des Figures

Figure 1: Paroi cellulaire de l'algue verte *Chaetomorpha melagonium* 5
Figure 2: Membrane plasmique de la cellule végétale 6
Figure 3: Le Noyau 7
Figure 4: Le réticulum endoplasmique avec les ribosomes 8
Figure 5: Dictyosome (appareil de Golgi) 9
Figure 6: Chloroplastes 10
Figure 7: Les chromoplastes du poivron rouge 11
Figure 8: Mitochondrie 12
Figure 9: Une petite partie d'une cellule de racine du tabac 13
Figure 10: Une petite partie d'une paroi cellulaire végétale 14
Figure 11: Le Cycle Cellulaire et les Stades de la Mitose 15
Figure 12: Les phases de la Mitose 17
Figure 13: Cellules du méristème 18
Figure 14: Méristéme caulinaire 20
Figure 15: Méristème racinaire 21
Figure 16: Méristème apical et latéral (primaire et secondaire) 22
Figure 17: Coupe transversale de la tige d'une plante ligneuse 23
Figure 18: Méristème intercalaire 24
Figure 19: Tissu de parenchyme 24
Figure 20: Parenchyme aérifère 25
Figure 21: Parenchyme chlorophyllien 26
Figure 22: Parenchyme de réserve du cortex de la racine de renoncule (*Ranunculus repens*). 27
Figure 23: Parenchyme aquifère de tige de cactus 27
Figure 24: Une partie d'une coupe transversale d'une feuille de Clivia 29
Figure 25: Poils à la surface d'une plante de menthe 30
Figure 26: Structure d'un stomate 30
Figure 27: Périderme 31
Figure 28 : Périderme et une lenticelle 32
Figure 29: Cellules secrétrices du parenchyme cortical 33
Figure 30: Structure des canaux sécrétoires de différentes plantes 34
Figure 31: Poches sécrétrices (tige d'estragon) 35
Figure 32: Différents types d'épaississements dans les parois des vaisseaux 36
Figure 33: Trachéides 37
Figure 34 : a) Microphotographies obtenues en microscopie électronique 38
Figure 35: Phloéme 39
Figure 36: Les différents formes de cellules du collenchyme 40
Figure 37: Collenchyme 41
Figure 38: A. Scléréides (cellules pierreuses) d'une poire en coupe transversale 42

Figure 39: Fibres 43
Figure 40 : Systèmes racinaires 45
Figure 41 : Variations des racines pivotantes 45
Figure 42: Croissance secondaire chez plantes ligneuses 47
Figure 43: Cormes de glaïeul ; système racinaire fasciculé 47
F**igure 44**: A ; Observation microscopique d'une coupe longitudinale d'une racine 49
Figure 45 : Méristème apicale racinaire de l'oignon 50
Figure 46: (a) Un plant de radis (Raphanus) peu après la germination 51
Figure 47: Le cortex 52
Figure 48: Une coupe transversale d'une racine dicotylédone. 53
Figure 49 : Schéma montrant les différents types de racines 54
Figure 50 : Un rameau ligneux 56
Figure 51: Une coupe longitudinale à travers l'extrémité d'une tige de Coleus 58
Figure 52: (a) : Une coupe transversale d'une tige herbacée dicotylédone (luzerne). 60
Figure 53: Une coupe transversale d'une partie d'une jeune tige de tilleul (Tilia) 60
Figure 54: (a) Une coupe transversale d'un mélèze 62
Figure 55: Canaux de résine dans une portion de tige de pin (Pinus) 63
Figure 56: a) Une coupe transversale d'une monocotylédone (Maïs Zea *mays*) 64
Figure 57: Les différents types de tiges spécialisées 65
Figure 58: Les tiges aplaties des cactus raquettes 67
Figure 59: Illustration des Types de Feuilles Composées 69
Figure 60: Les forme des feuilles selon les nervures 70
Figure 61: Types de feuilles et disposition de feuilles. 71
Figure 62: Les feuilles flottantes du nénuphar géant (*Victoria amazonica*) 72
Figure 63: Vue stéréoscopique d'une portion d'une feuille typique. 74
Figure 64: Coupe transversale d'une feuille 75
Figure 65: Feuilles de houx (Ilex) 76
Figure 66: (A) Feuilles de canne à sucre. 77
Figure 67: Dans une coupe de tige, 11 faisceaux sont visibles (en rouge) 78
Figure 68: Morphologie d'une fleur typique 79
Figure 69:Les types d'inflorescences 80
Figure 70: Pièces fertiles d'une fleur 81
Figure 71: (a) ovaire supère – (b) ovaire semi-infère – (c) ovaire infère 83
Figure 72: Nombre de pièces florales par verticille 83
Figure 73: Les régions d'un fruit mature 85
Figure 74: Les fruits charnus à noyaux et à pepins 86
Figure 75: Les différents fruits secs indéhiscents 87
Figure 76: Les différents fruits secs déhiscents 88

Figure 77: Les oranges de l'Osage (Maclura) 89
Figure 78: Coupe transversale d'une pomme 89
Figure 79: Les différents types de fruits 90
Figure 80: Morphologie d'une graine de haricot 92
Figure 81: Schéma d'une graine à périsperme (a), albuminée (b), exalbuminée (c) 92
Figure 82: Graine dicot 94
Figure 83: Graine monocot de maïs 94
Figure 84: Structure du grain de pollen 96
Figure 85: Formation du grain de pollen (microgamétogénèse) 97
Figure 86: Schéma d'un ovule d'Angiosperme 98
Figure 87: Schéma d'un Sac embryonnaire 99
Figure 88: **I** : autopollinisation, **II** : pollinisation croisée 101
Figure 89: Germination du pollen 102
Figure 90 : Schéma du processus de la double fécondation 103

Liste des Tableaux

Tableau 1: Classification en fonction de la structure végétale 2
Tableau 2: Classification en fonction de la présence ou absence de vaisseaux conducteur 3
Tableau 3: Classification en fonction de la visibilité de l'appareil reproducteur 3

Introduction

Relation entre l'être humain et la plante

Notre dépendance à l'égard des organismes verts pour produire l'oxygène de l'air que nous respirons et éliminer le dioxyde de carbone que nous dégageons ne s'arrête pas là.

Les plantes sont également à l'origine de produits qui font tellement partie de la société humaine que nous les tenons largement pour acquis. Nous savons bien sûr que le riz, le maïs, les pommes de terre et autres légumes sont des plantes ; mais tous les aliments, y compris la viande, le poisson, la volaille, les œufs, le fromage et le lait, pour n'en citer que quelques-uns, doivent leur existence aux plantes.

Les condiments tels que les épices et les produits de luxe tels que les parfums sont produits par les plantes, tout comme certains colorants, adhésifs, fibres de couture chirurgicales digestibles, stabilisants alimentaires, boissons et émulsifiants.

Nos maisons sont construites avec du bois provenant d'arbres, qui fournit également la cellulose du papier, du carton et des fibres synthétiques. Certains de nos vêtements, équipements de camping, literie, tentures et autres articles textiles sont fabriqués à partir de fibres provenant de nombreuses familles de plantes différentes.

Autrefois, tous les médicaments provenaient de plantes, de champignons ou de bactéries, et de nombreux médicaments importants, notamment la plupart des antibiotiques, le sont encore.

Classification des végétaux

Le règne végétal compte plus de 400.000 espèces si on y inclut les champignons considérés maintenant comme un règne distinct de celui des végétaux et des animaux. Il est au même titre que celui des animaux subdivisés en embranchements, classes, ordres, familles, genres et espèces. La première classification connue est l'œuvre de Théophraste, qui classe les plantes selon leur port en : arbre, arbuste et herbe. Cependant, les végétaux peuvent être classés en fonction de l'organisation structurale de l'appareil végétatif, en deux embranchements : les thallophytes et les cormophytes

Les thallophytes sont caractérisés par un appareil végétatif non différencié en tissus et organes, représenté par un thalle. Ils comprennent trois sous-embranchements : les phycophytes (algues), les mycophytes (champignons) et

les lichenophytes (lichens). Ces plantes sont décrites comme ne possédant pas de vaisseaux conducteurs et sont considérées comme des cryptogames en raison de leur appareil reproducteur invisible.

Les cormophytes, en revanche, ont un appareil végétatif appelé cormus, composé de tissus et d'organes différenciés tels que tiges, feuilles et racines. Ils comprennent quatre sous-embranchements : les bryophytes (mousses), les ptéridophytes (fougères), les préspermaphytes (zamia) et les spermaphytes (plantes à graines). Parmi ces derniers, les ptéridophytes, les préspermaphytes et les spermaphytes possèdent des vaisseaux conducteurs et sont donc des trachéophytes, tandis que les bryophytes en sont dépourvues. De plus, les bryophytes et les ptéridophytes sont considérées comme des cryptogames en raison de leur appareil reproducteur invisible, tandis que les préspermaphytes et les spermaphytes sont considérées comme des phanérogames en raison de la visibilité de leur appareil reproducteur.

Cependant, les spermaphytes, qui sont des cormophytes, sont subdivisées en deux super-classes : les **gymnospermes**, dont les graines sont nues, et les **angiospermes**, dont les graines sont enfermées dans un fruit. Les angiospermes sont à leur tour divisées en deux classes : les **dicotylédones**, avec des graines à deux cotylédons, et les **monocotylédones**, avec des graines à un seul cotylédon.

Tableau 1: Classification en fonction de la structure végétale

Embranchements	Sous-embranchements	Super classe
Thallophytes	Phycophytes (Algues)	
	Mycophytes (Champignons)	
	Lichenophytes (Lichens)	
Cormophytes	Bryophytes (Mousses)	
	Ptéridophytes (Fougères)	
	Préspermaphytes (Zamia)	
	Spermaphytes	Gymnospermes (Sapins, Pins) (graines nues)
		Angiospermes (Dicotylédones, Monocotylédones) (graines couvertes)

Tableau 2: Classification en fonction de la présence ou absence de vaisseaux conducteur

Plantes non vascularisées	Algue
	Lichens
	Bryophytes (Mousses)
Plantes vascularisées : les trachéophytes	Ptéridophytes (Fougères)
	Préspermaphytes (Zamia)
	Spermaphytes (manguier, riz, pin)

Tableau 3: Classification en fonction de la visibilité de l'appareil reproducteur

Cryptogames (appareil reproducteur invisible)	Phycophytes (Algues)
	Lichenophytes (Lichens)
	Bryophytes (Mousses)
Phanérogames (appareil reproducteur visible)	Préspermaphytes (Zamia)
	Spermaphytes (manguier, riz, pin)

Chapitre 1

L'ORGANISATION CELLULAIRE DES VÉGÉTAUX

Chapitre 1 : L'organisation cellulaire des végétaux

1.1.Paroi cellulaire

Les cellules végétales se distinguent des animaux par l'absence de structures squelettiques internes, mais elles possèdent des parois cellulaires qui assurent leur soutien et leur protection (Figure 1). Ces parois peuvent être rigides ou semi-rigides, et elles sont cruciales pour maintenir la structure des plantes, telles que les grands arbres comme les séquoias et les eucalyptus de Tasmanie, capables de supporter des poids immenses grâce à la résistance collective des millions de cellules qui les composent.

- La cellulose, le principal composant des parois cellulaires, est un polymère constitué de chaînes de glucose et constitue le polymère le plus abondant sur Terre. Elle est essentielle à la vie végétale et animale, car elle est la base de la nutrition pour de nombreux organismes. Outre la cellulose, les parois contiennent également de l'hémicellulose, de la pectine et des glycoprotéines, qui contribuent à la solidité et à la flexibilité des structures végétales.

- Lors de la formation des nouvelles cellules, une lamelle moyenne composée de pectine est produite entre deux cellules adjacentes. De chaque côté de cette lamelle, une paroi primaire flexible se forme, composée de cellulose, d'hémicellulose, de pectine et de glycoprotéines. La croissance cellulaire entraîne un réarrangement de cette paroi. En vieillissant, les cellules peuvent développer une paroi secondaire, plus épaisse et riche en lignine, qui renforce encore la paroi cellulaire. Ces parois secondaires, contenant jusqu'à 80 % de cellulose, peuvent constituer la majeure partie du volume de la cellule, renforçant ainsi la structure des plantes adultes.

Communication entre cellules ?

Bien que chaque cellule vivante soit capable d'exercer indépendamment des activités complexes, il est essentiel que ces activités soient coordonnées par un moyen de communication entre toutes les cellules vivantes d'un organisme. **Les plasmodesmes**, de petits canaux de cytoplasme, facilitent le passage des fluides et des substances dissoutes à travers les parois primaires des cellules adjacentes. Ainsi, la translocation des sucres, des acides aminés, des ions et d'autres substances se réalise via ces plasmodesmes. Toutefois, les lamelles moyennes et la majorité des parois cellulaires restent perméables, permettant un échange plus lent de l'eau et des substances dissoutes entre les cellules.

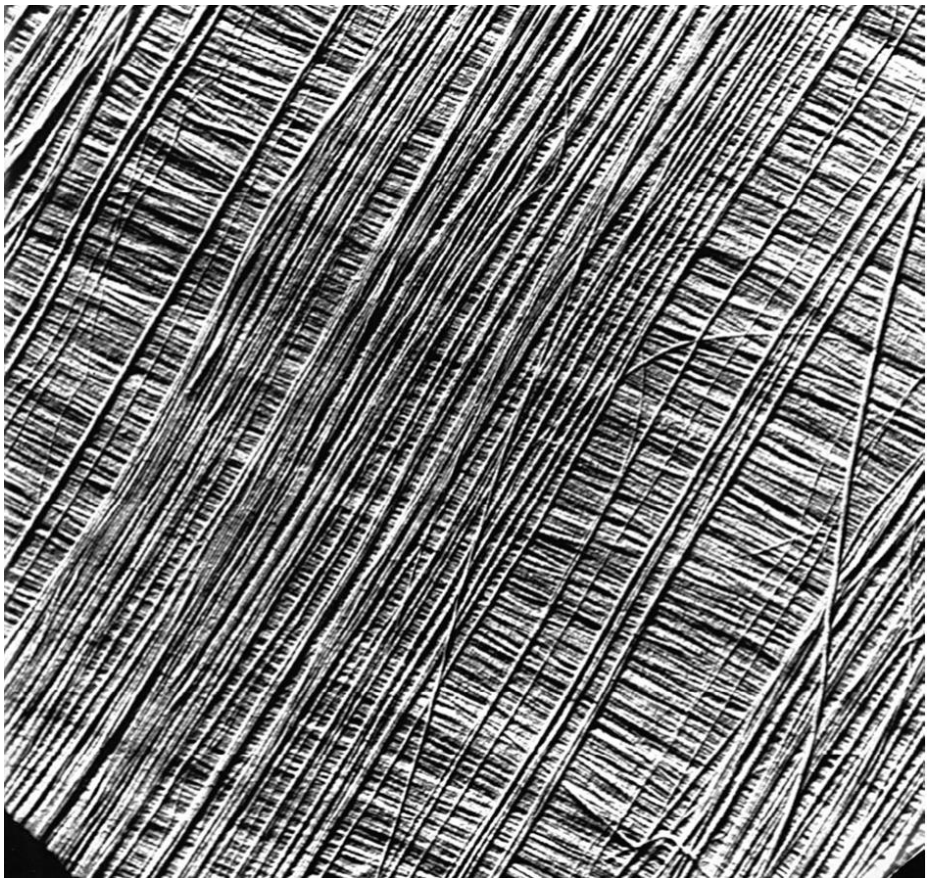


Figure 1: Paroi cellulaire de l'algue verte *Chaetomorpha melagonium*, montrant comment se déposent les microfibrilles de cellulose. Chaque microfibrille est composée de nombreuses molécules de cellulose

1.2.Membrane plasmique

La limite extérieure de la partie vivante de la cellule, la membrane plasmique, a une épaisseur d'environ huit millionièmes de millimètre. Pour avoir une idée de l'incroyable finesse de cette membrane, considérons qu'il faudrait 12 500 membranes de ce type soigneusement empilées en pile pour obtenir l'épaisseur d'un morceau de papier à lettres ordinaire. Cette structure délicate et semi-perméable est d'une importance vitale dans la régulation du mouvement des substances entrant et sortant de la cellule. Bien que la membrane plasmique puisse inhiber le mouvement de certaines substances, elle peut autrement permettre la libre circulation et même contrôler le mouvement d'autres substances entrantes et sortant de la cellule. En conséquence, les proportions et la composition des produits chimiques à l'intérieur d'une cellule deviennent très différentes de celles à l'extérieur de la cellule.

La membrane plasmique participe également à la production et à l'assemblage de cellulose pour les parois cellulaires. Les preuves obtenues depuis le début des années 1970 indiquent que la membrane plasmique et les autres membranes

cellulaires sont composées de phospholipides disposés en deux couches, avec des protéines intercalées partout (Figure 2). Des liaisons covalentes relient les glucides aux lipides et aux protéines sur les surfaces externes de membranes. Certaines protéines s'étendent sur toute la largeur de la membrane, tandis que d'autres sont intégrées ou apparemment vaguement liées à la surface externe.

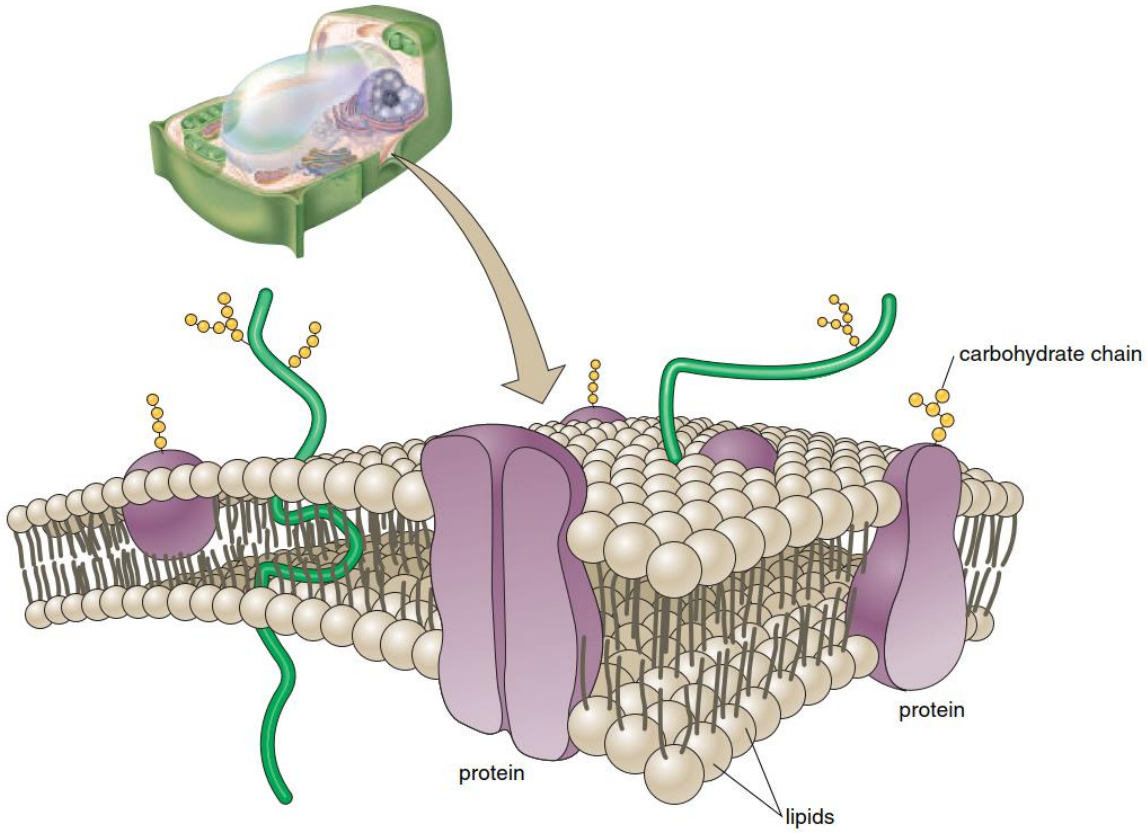


Figure 2: Membrane plasmique de la cellule végétale

1.3.Le noyau

Le noyau est le centre de contrôle de la cellule. D'une certaine manière, il fonctionne comme une combinaison d'un programme informatique et d'un répartiteur qui envoie des messages codés ou des « blueprints » provenant de l'ADN du noyau avec des informations qui seront finalement utilisées dans d'autres parties de la cellule. En d'autres termes, l'ADN du noyau fournit l'information originale nécessaire pour répondre aux besoins de la cellule. Ces informations nucléaires contribuent à la croissance, à la différenciation et les activités de « l'usine » cellulaire complexe. Le noyau stocke également des informations héréditaires, qui sont transmises de cellule en cellule à mesure que de nouvelles cellules se forment. Certains champignons et algues possèdent de

nombreux noyaux au sein d'une seule cellule très ramifiée, mais les cellules de plantes plus complexes ont généralement un seul noyau. Chaque noyau est délimité par deux membranes qui constituent ensemble l'enveloppe nucléaire. Des pores structurellement complexes, espacés d'environ 50 à 75 nanomètres, occupent jusqu'à un tiers de la surface totale de l'enveloppe nucléaire (Figure 3).

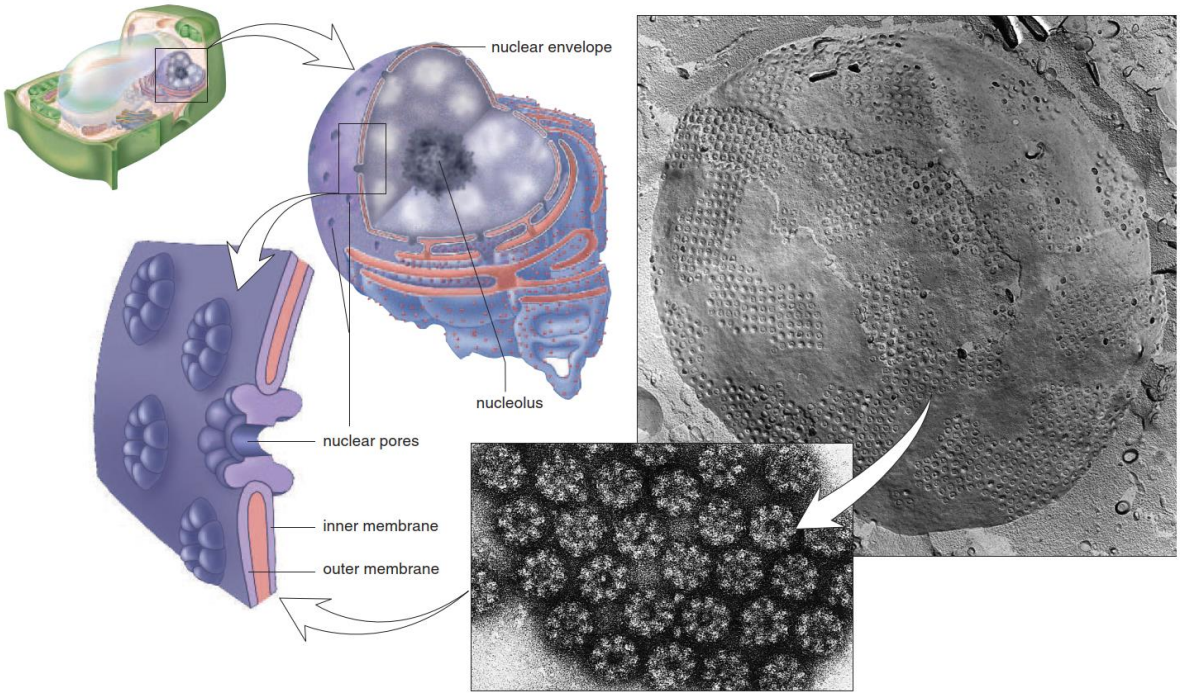


Figure 3: Le Noyau

1.4.Le réticulum endoplasmique

La membrane externe du noyau est reliée et continue avec le réticulum endoplasmique. Le réticulum endoplasmique facilite la communication cellulaire et la canalisation des matériaux. De nombreuses activités importantes, telles que la synthèse de membranes pour d'autres organites et la modification de protéines à partir de composants assemblés ailleurs dans la cellule, se produisent soit à la surface du réticulum endoplasmique, soit à l'intérieur de ses compartiments. Le réticulum endoplasmique (souvent appelé simplement RE) est un espace clos constitué d'un réseau de sacs et de tubes aplatis qui forment des canaux dans tout le cytoplasme, la quantité et la forme variant considérablement d'une cellule à l'autre. Les micrographies électroniques à transmission du RE sectionné lui donnent l'apparence d'une

série de membranes parallèles qui ressemblent à des tubes ou à des sacs longs et étroits, créant des sous-compartiments à l'intérieur de la cellule (Figure 4).

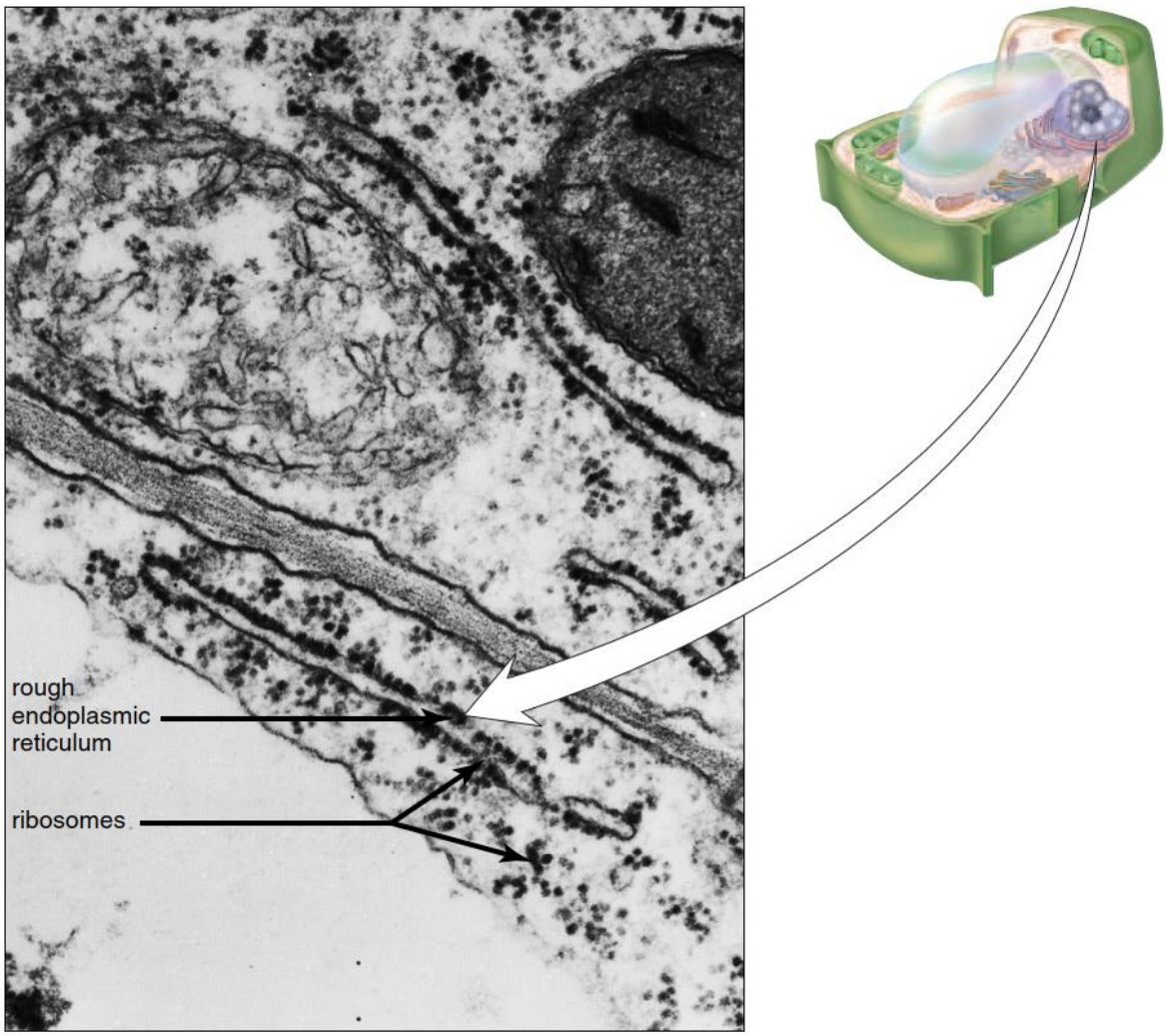


Figure 4: Le réticulum endoplasmique avec les ribosomes

1.5.Ribosomes

Les ribosomes sont de petits corps qui mesurent d'environ 20 nanomètres de diamètre, composés de deux sous-unités composées d'ARN et de protéines. Les sous-unités ribosomales sont assemblées dans le nucléole, libérées et, en association avec des molécules d'ARN spéciales, elles initient la synthèse des protéines. Environ 55 types de protéines se trouvent dans chaque ribosome des cellules procaryotes et un nombre légèrement plus élevé dans ceux des cellules eucaryotes. Contrairement à d'autres organites, les ribosomes n'ont pas de membrane limitante et c'est pour cette raison que certains scientifiques préfèrent ne pas les appeler organites (Figure 4).

1.6.Dictyosomes

Les dictyosomes, ou appareil de Golgi, sont des sacs aplatis répartis dans le cytoplasme des cellules (Figure 5). Ils sont souvent organisés en piles et jouent un rôle clé dans la modification des glucides liés aux protéines et l'assemblage de polysaccharides complexes. Ces polysaccharides sont ensuite envoyés dans des vésicules qui fusionnent avec la membrane plasmique pour libérer leur contenu à l'extérieur de la cellule. Les dictyosomes sont également responsables de la production et de la modification des enzymes nécessaires à l'empaquetage des protéines. En somme, ils agissent comme des centres de collecte, d'emballage et de livraison au sein de la cellule.

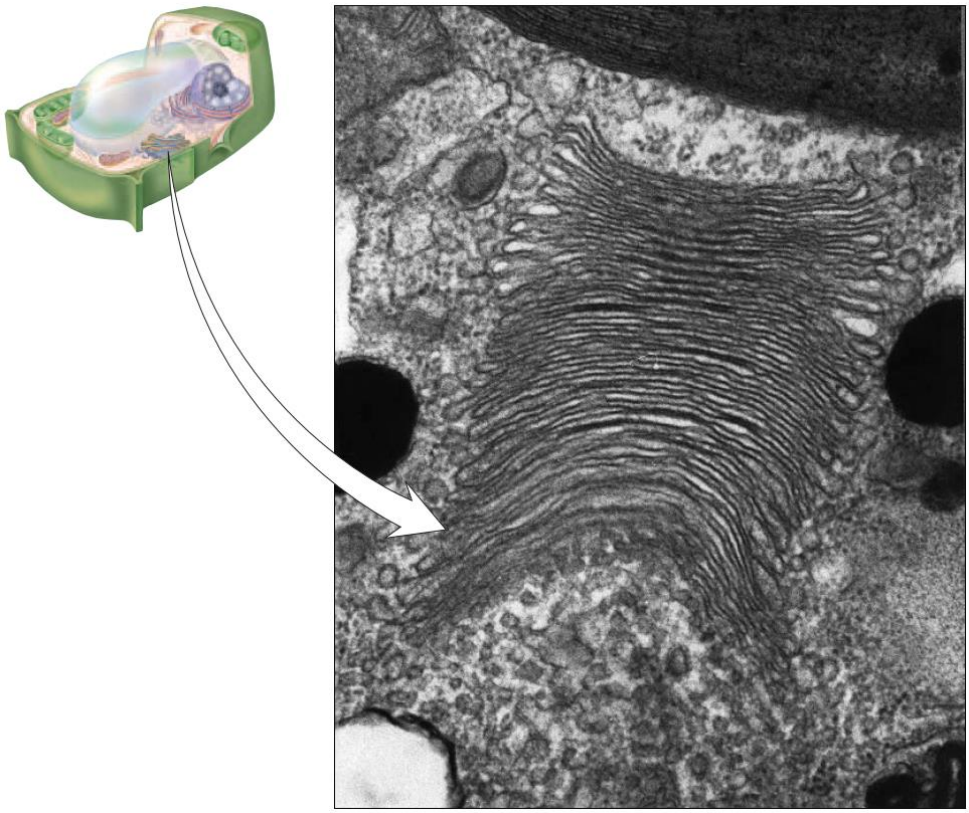


Figure 5: Dictyosome (appareil de Golgi)

1.7.Plastes

Les plastes de tous types se développent à partir de **proplastes**, qui sont de petits organites vert pâle ou incolores. Ils ont une structure interne plus simple que les plastes et ont moins de thylakoïdes, les thylakoïdes n'étant pas disposés en piles de grana. Les proplastes se divisent fréquemment et se répartissent dans toute la cellule. Après qu'une cellule elle-même se divise, chaque cellule fille a une part proportionnelle. Les plastes résultent également de la division de plastes matures existants. La plupart des cellules végétales vivantes possèdent

plusieurs types de plastes, les chloroplastes étant les plus visibles. Ils se présentent sous diverses formes et tailles.

a) Chloroplaste :

Les chloroplastes, organites présents dans les cellules végétales, varient en nombre selon les plantes, certaines ayant entre 75 et 125 chloroplastes par cellule, voire plusieurs centaines dans certaines plantes. Chaque chloroplaste mesure entre 2 et 10 micromètres et est entouré de deux membranes, l'une provenant du réticulum endoplasmique et l'autre de la membrane d'une cyanobactérie. À l'intérieur, un fluide appelé stroma contient des enzymes et une petite molécule d'ADN qui code des protéines liées à la photosynthèse et à d'autres fonctions cellulaires. Les chloroplastes possèdent des grana, des empilements de membranes contenant des thylakoïdes, où se déroule la photosynthèse (Figure 6). Ce processus permet aux plantes de transformer l'eau et le dioxyde de carbone en nutriments à l'aide de l'énergie solaire, une activité essentielle à la vie humaine et animale. Le stroma contient également des grains d'amidon, des gouttelettes d'huile, des enzymes et des ribosomes, et dans certains plastes, des protéines sont stockées.

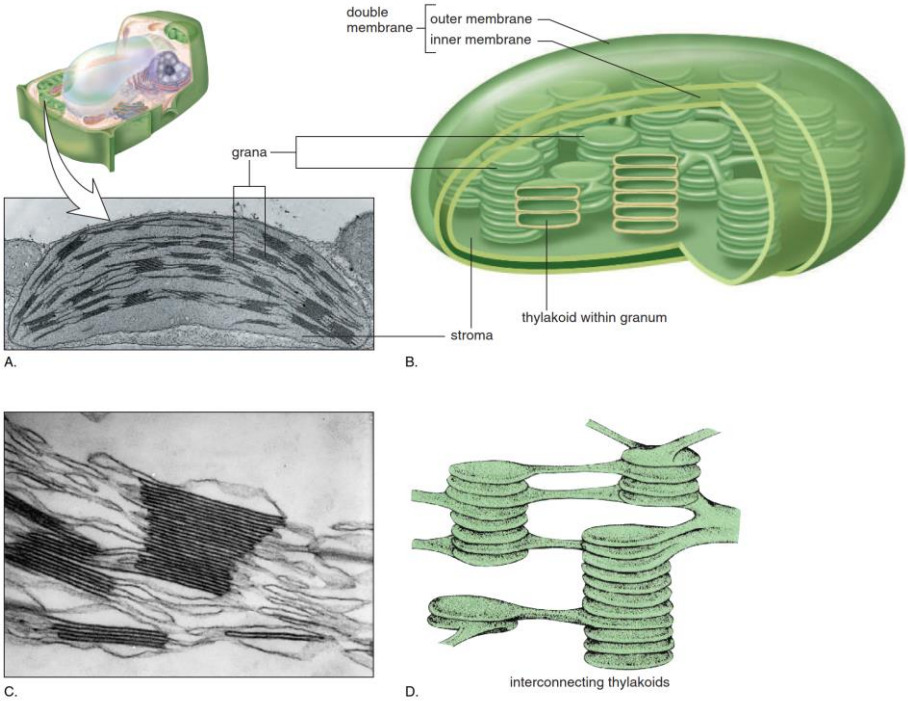


Figure 6: Chloroplastes

b) **Chromoplastes**

Les chromoplastes sont un autre type de plaste trouvé dans certaines cellules végétales. Ils se développent parfois à partir de chloroplastes suite à des modifications internes qui incluent la disparition de la chlorophylle. Les chromoplastes sont de couleur jaune, orange ou rouge en raison de la présence de pigments caroténoïdes qu'ils synthétisent et accumulent. Ils sont plus abondants dans les parties jaunes, oranges ou certaines parties rouges des plantes, comme les tomates mûres, les carottes ou les poivrons rouges (Figure 7). Ces pigments caroténoïdes, liposolubles, ne sont cependant pas les pigments prédominants dans la plupart des pétales de fleurs rouges. Les pigments anthocyaniques de la plupart des pétales de fleurs rouges sont solubles dans l'eau.

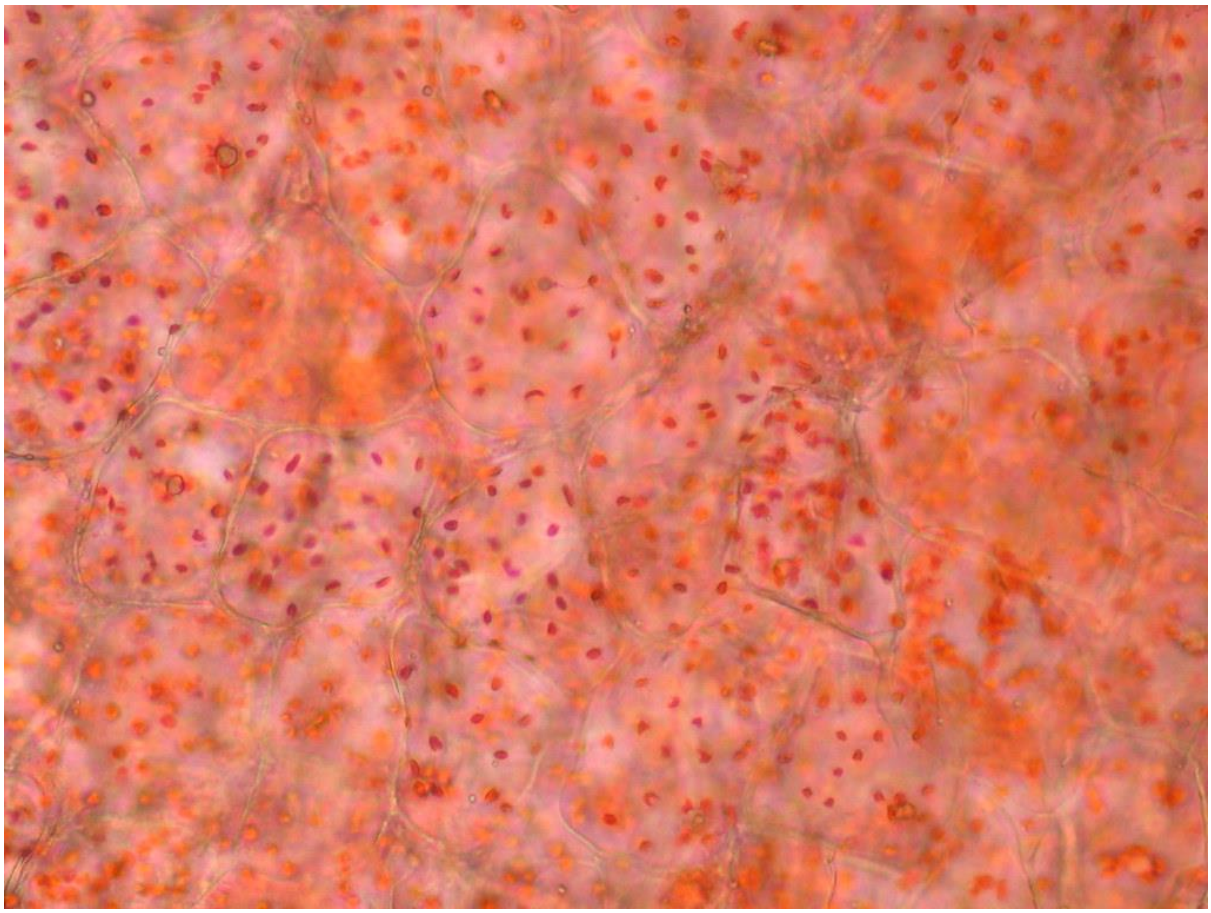


Figure 7: Les chromoplastes du poivron rouge

c) **Leucoplastes**

Se sont encore un autre type de plaste commun aux cellules des plantes supérieures. Ils sont essentiellement incolores et comprennent les amyloplastes, qui synthétisent les amidons, et les élaioplastes (Oléoplaste), qui synthétisent

les huiles. S'ils sont exposés à la lumière, certains leucoplastes se transformeront en chloroplastes et vice versa.

1.8.Mitochondrie

Les mitochondries, souvent qualifiées de centrales électriques de la cellule, sont responsables de la production d'énergie par la respiration cellulaire, fournissant ainsi l'énergie nécessaire aux cellules et à la plante dans son ensemble. Ces organites sont petits (1 à 3 micromètres de long et environ 0,5 micromètre de large) et souvent invisibles au microscope optique (Figure 8). Elles se déplacent constamment dans la cellule et s'accumulent là où l'énergie est requise. Les mitochondries se divisent par scission, se reproduisant à partir de mitochondries préexistantes. Elles sont entourées de deux membranes, l'une interne et l'autre externe, et la membrane interne forme des replis appelés crêtes, qui augmentent la surface pour les enzymes. Le liquide matriciel à l'intérieur contient de l'ADN, de l'ARN, des ribosomes, des protéines et d'autres substances dissoutes. Le nombre de crêtes et de mitochondries peut varier en fonction des besoins énergétiques de la cellule.

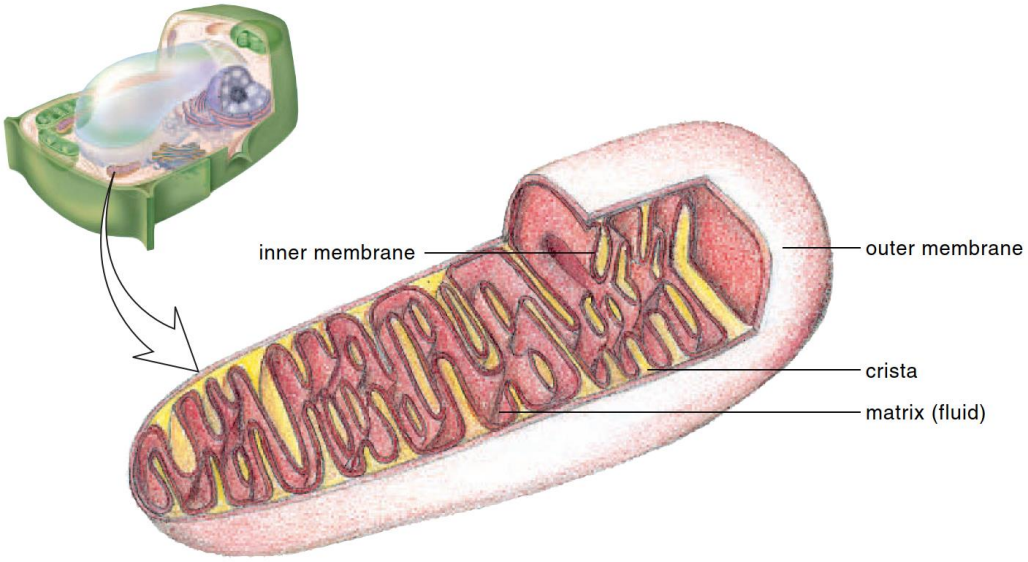


Figure 8: Mitochondrie

1.9.Vacuole

Les vacuoles, présentes dans les cellules végétales matures, occupent souvent jusqu'à 90 % de leur volume, avec une ou deux grandes vacuoles centrales délimitées par des membranes appelées tonoplastes (Figure 9). Ces membranes ont des fonctions similaires à celles des membranes plasmiques. Les vacuoles contiennent de la sève cellulaire, un liquide aqueux légèrement acide, qui aide

à maintenir la pression interne de la cellule. Cette sève contient des substances dissoutes, comme des sels, des sucres, des acides organiques, des protéines solubles, ainsi que des pigments hydrosolubles appelés anthocyanes, responsables des couleurs rouges, bleues et violettes des fleurs et de certaines feuilles en automne. Les vacuoles peuvent aussi contenir des pigments caroténoïdes, responsables des couleurs jaunes des feuilles d'automne. Les vacuoles accumulent également des cristaux de déchets formés par la concentration d'ions. Dans les cellules jeunes, les vacuoles sont petites et nombreuses, mais elles grossissent et fusionnent au fur et à mesure de la maturation de la cellule. En plus de stocker diverses substances, elles participent au recyclage de matériaux et à la dégradation des organites comme les plastes et les mitochondries.

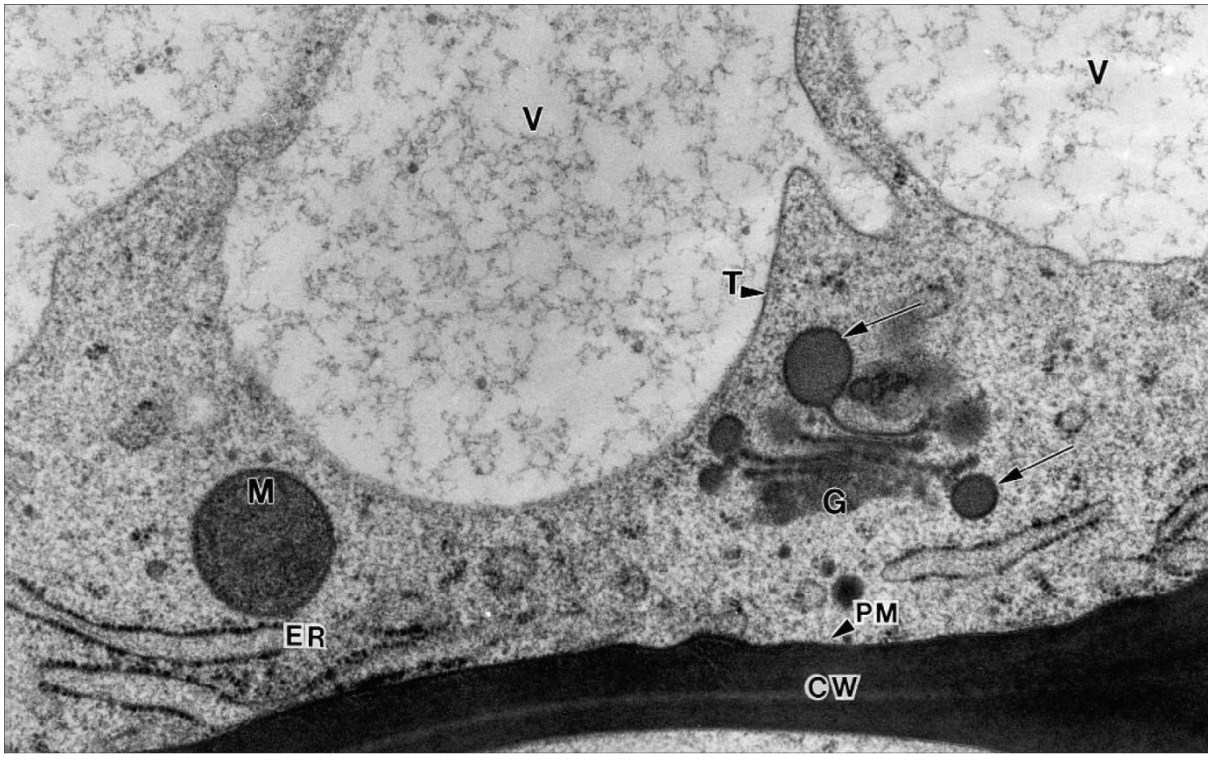


Figure 9: Une petite partie d'une cellule de racine du tabac, ×100 000. V = vacuole ; T = membrane vacuolaire (tonoplaste) ; G = dictyosome avec vésicules (flèches) ; M = mitochondrie ; ER = réticulum endoplasmique ; PM = membrane plasmique ; CW = paroi cellulaire

1.10. Cytosquelette

Le cytosquelette est impliqué dans le mouvement au sein d'une cellule et dans son architecture. Il s'agit d'un réseau complexe constitué principalement de deux types de fibres : les microtubules et les microfilaments. Les microtubules contrôlent apparemment l'ajout de cellulose à la paroi cellulaire (Figure 10). Ils sont également impliqués dans la division cellulaire, le mouvement des organites cytoplasmiques, contrôlant le mouvement des vésicules contenant des composants de la paroi cellulaire assemblés par les dictyosomes.

Les **microtubules** sont des structures tubulaires non ramifiées, minces et creuses qui ressemblent à de minuscules pailles. Ils sont composés de protéines appelées tubulines et sont de longueurs variables, la plupart mesurant entre 15 et 25 nanomètres de diamètre. On les trouve le plus souvent juste à l'intérieur de la membrane plasmique. Les microtubules se trouvent également dans les fibres spéciales qui forment les fuseaux et les phragmoplastes des cellules en division discutées plus loin dans ce chapitre.

Les **microfilaments**, qui jouent un rôle majeur dans la contraction et le mouvement des cellules chez les animaux multicellulaires, sont présents dans presque toutes les cellules. Ils sont trois à quatre fois plus fins que les microtubules et sont constitués de longs et fins fils de protéines d'un diamètre moyen de 6 nanomètres. Ils sont souvent regroupés en faisceaux et semblent jouer un rôle dans le flux cytoplasmique (parfois appelé cyclose) qui se produit dans toutes les cellules vivantes.

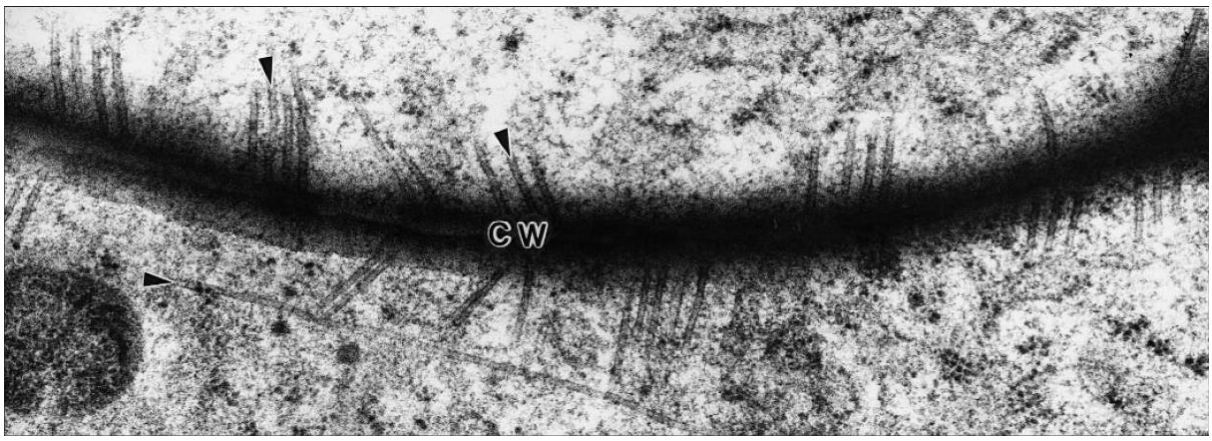


Figure 10: Une petite partie d'une paroi cellulaire végétale avec des microtubules plus ou moins perpendiculaires

2. REPRODUCTION CELLULAIRE

Le cycle cellulaire

Lorsque les cellules se divisent, elles passent par une série ordonnée d'événements appelés cycle cellulaire. Ce cycle est généralement divisé en interphase et mitose, la mitose elle-même étant subdivisée en quatre phases (Figure 11). La durée du cycle cellulaire varie en fonction du type d'organisme impliqué, du type de cellule au sein d'un organisme, ainsi que de la température et d'autres facteurs environnementaux. Dans la plupart des cas, cependant, l'interphase peut occuper jusqu'à 90 % ou plus du temps nécessaire pour terminer le cycle. Le temps relativement court impliqué dans la division réelle explique pourquoi la plupart des cellules observées au microscope sont en interphase, et les cellules en phase de mitose peuvent être difficiles à trouver.

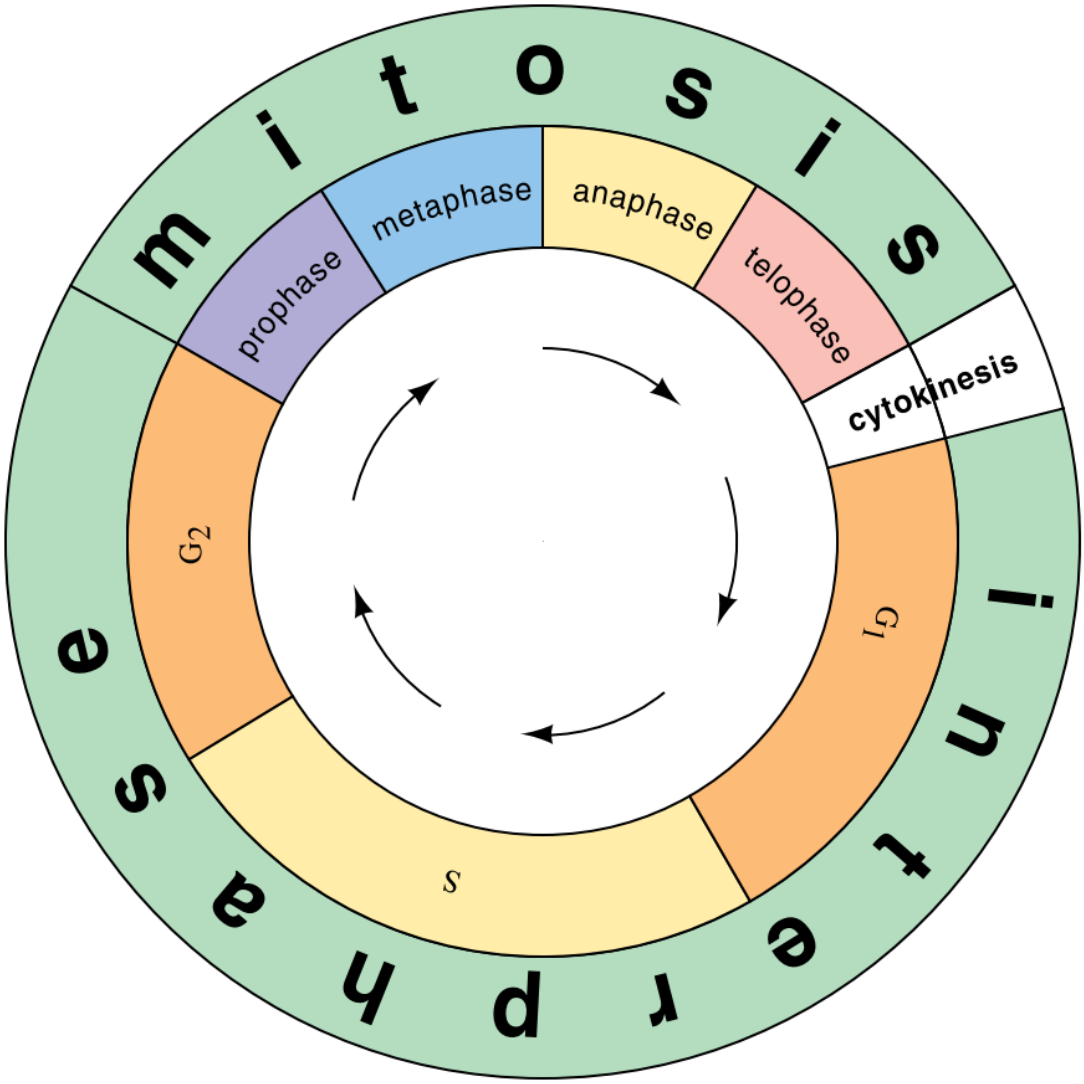


Figure 11: Le Cycle Cellulaire et les Stades de la Mitose

2.1.Interphase

Les cellules qui ne se divisent pas sont en phase G0, un état de repos où elles ne se préparent pas à la division cellulaire et peuvent y rester pendant un certain temps. L'interphase est la période où la cellule se prépare activement à la division. Elle se divise en trois phases : G1, S et G2. La phase G1 commence immédiatement après la division cellulaire et dure un certain temps, pendant laquelle la cellule augmente en taille et produit des substances nécessaires pour préparer la phase S. La phase S est marquée par la réplication de l'ADN, et dans la phase G2, la cellule se prépare pour la mitose en produisant des organites et des microtubules. À la fin de G2, la cellule a produit les facteurs nécessaires à la division nucléaire. L'interphase précède la mitose, qui comprend la division du noyau (caryocinèse) et du cytoplasme (cytokinèse) (Figure 11).

La division proprement dite implique deux processus : (1) la division du noyau, appelée caryocinèse, et (2) la division du cytoplasme, appelée cytokinèse. Il existe deux types de caryokinèse : la **mitose** et la méiose.

2.2.Mitose

La mitose est un processus de division cellulaire qui permet à une cellule mère de se diviser en deux cellules filles identiques, chacune avec la même quantité d'ADN. Ce processus se déroule en plusieurs étapes distinctes : la prophase, la métaphase, l'anaphase, la télophase et la cytokinèse (Figure 12).

- **Prophase** : Les chromosomes deviennent plus courts et plus épais, et les chromatides s'individualisent. L'enveloppe nucléaire se fragmente et le nucléole disparaît. Les fibres du fuseau, constituées de microtubules, commencent à se former et s'étendent entre deux pôles invisibles de la cellule. À ce stade, les chromosomes, bien que toujours dans le noyau, se préparent à se séparer.
- **Métaphase** : Les chromosomes s'alignent au centre de la cellule, sur une plaque équatoriale invisible, perpendiculaire à l'axe du fuseau. Les centromères des chromosomes se séparent à la fin de cette phase.
- **Anaphase** : C'est la phase la plus courte, durant laquelle les chromatides sœurs de chaque chromosome sont séparées et se déplacent vers les pôles opposés de la cellule. Ce mouvement est causé par le raccourcissement des fibres du fuseau.

- **Télophase** : Les chromosomes filles sont entourés par une nouvelle enveloppe nucléaire, les chromosomes deviennent plus longs et fins, les nucléoles réapparaissent et les fibres du fuseau se désintègrent. À ce stade, une plaque cellulaire commence à se former, signalant la fin de la division du noyau.
- **Cytokinèse** : C'est la division du cytoplasme et des organites. Bien que la distribution des organites soit aléatoire, chaque cellule fille reçoit suffisamment de matériel pour fonctionner. Cependant, la division du matériel génétique est cruciale, car toute absence de gène ou de chromosome dans une cellule fille peut empêcher son bon fonctionnement.

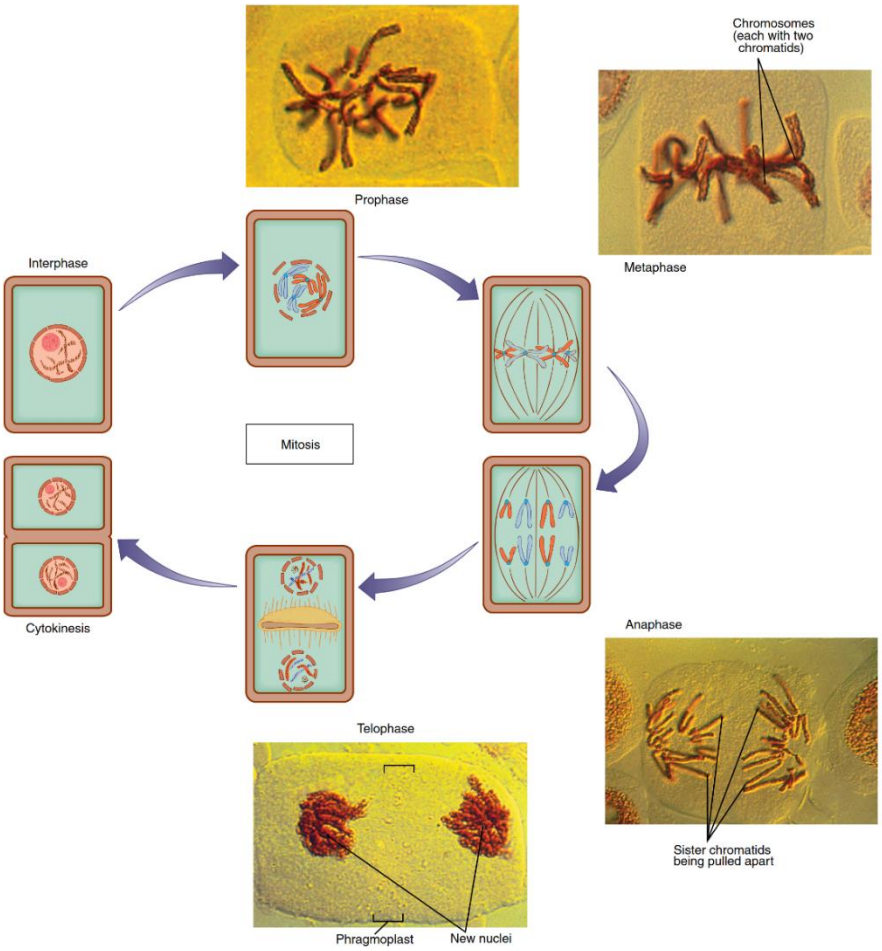


Figure 12: Les phases de la Mitose

CHAPITRE 2
LES DIFFÉRENTS TYPES DE TISSUS VEGETAUX

Chapitre 2 : LES DIFFÉRENTS TYPES DE TISSUS VEGETAUX

Les tissus végétaux sont nombreux. Il est possible cependant de les regrouper en six catégories :

- Tissus méristématiques
- Tissus de remplissage (parenchymes)
- Tissus de revêtement (protection)
- Tissus de sécrétion
- Tissus conducteurs
- Tissus de soutien

1. TISSUS MÉRISTÉMATIQUES

Contrairement aux animaux, les plantes possèdent des régions de croissance permanentes appelées méristèmes, ou tissus méristématiques, où les cellules se divisent activement (Figure 13). À mesure que de nouvelles cellules sont produites, elles sont généralement de petites structures en forme de boîte à six côtés, chacune avec un noyau proportionnellement grand, généralement près du centre, et avec de minuscules vacuoles ou pas de vacuoles du tout. Cependant, à mesure que les cellules mûrissent, elles prennent de nombreuses formes et tailles différentes, chacune étant liée à la fonction ultime de la cellule ; les vacuoles augmentent de taille, occupant souvent plus de 90 % du volume de la cellule.

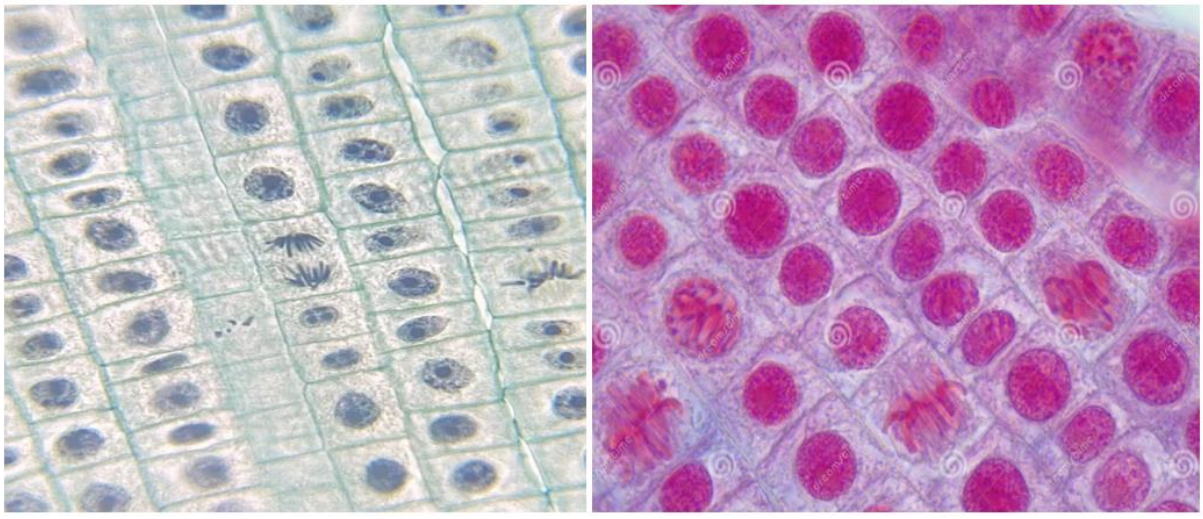


Figure 13: Cellules du méristème

1.1. Méristème apicale (primaire)

Les méristèmes apicaux sont des tissus méristématiques situés au niveau ou près des extrémités des racines et des tiges, et leur longueur augmente à mesure que ces méristèmes génèrent de nouvelles cellules. Ce processus est ce qu'on appelle la croissance primaire. C'est au niveau des apex que les nouveaux organes se forment grâce à l'activité des méristèmes. On distingue deux types de méristèmes : les méristèmes apicaux caulinaires, responsables des parties aériennes de la plante, et les méristèmes apicaux racinaires, qui forment les structures souterraines. Leur fonctionnement diffère considérablement.

Le méristème caulinaire (de la tige) est responsable de la construction de la partie aérienne de la plante. Il produit des cellules qui, en se multipliant et en se différenciant, donneront les feuilles, les bourgeons axillaires et floraux, ainsi que les tiges. Ce processus se répète indéfiniment et de manière régulière, jusqu'à la mort de la plante, générant la formation de phytomères, qui se composent d'un axe (ou entre-nœud), d'une ou plusieurs feuilles (comme dans le cas des feuilles opposées de l'érable) et d'un bourgeon axillaire (Figure 14).

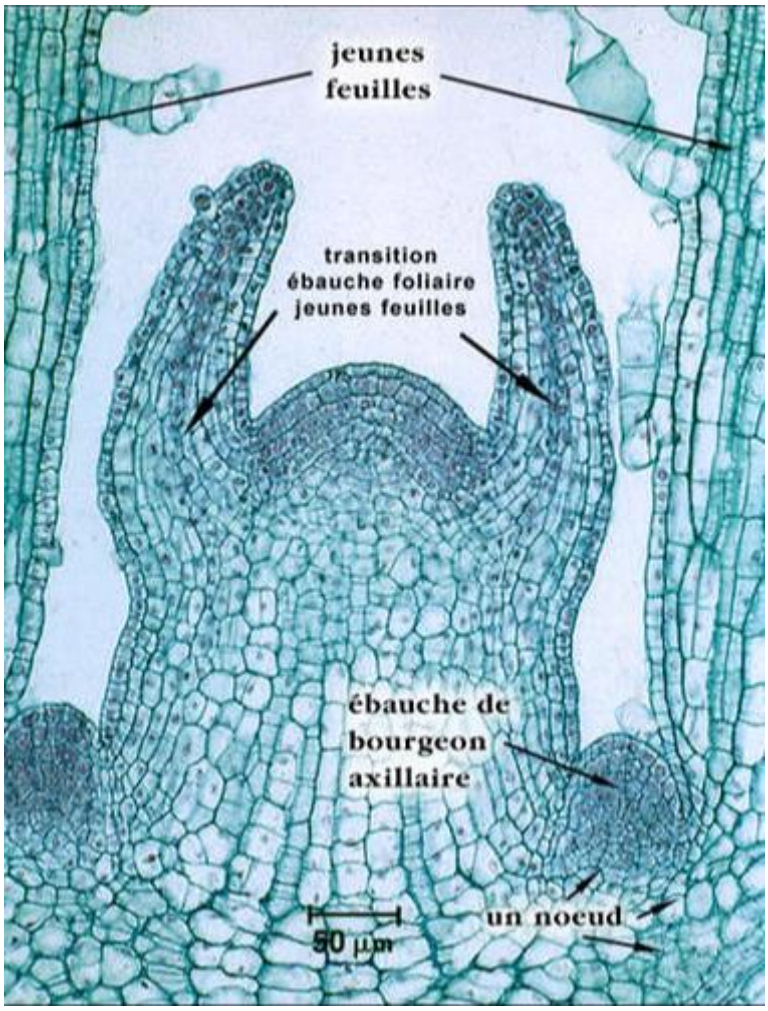


Figure 14: Méristéme caulinaire

Dans l'autre côté, l'allongement de la racine se fait par son extrémité au niveau du **méristème racinaire**. Celui-ci est d'un fonctionnement plus simple que le méristème caulinaire. À l'extrémité des racines, on distingue une coiffe, qui protège le méristème (Figure 15). Entre celle-ci et les poils absorbants, on observe une zone quiescente (sans division cellulaire), autour de laquelle on peut remarquer de très nombreuses divisions cellulaires qui sont à l'origine des tissus de la racine

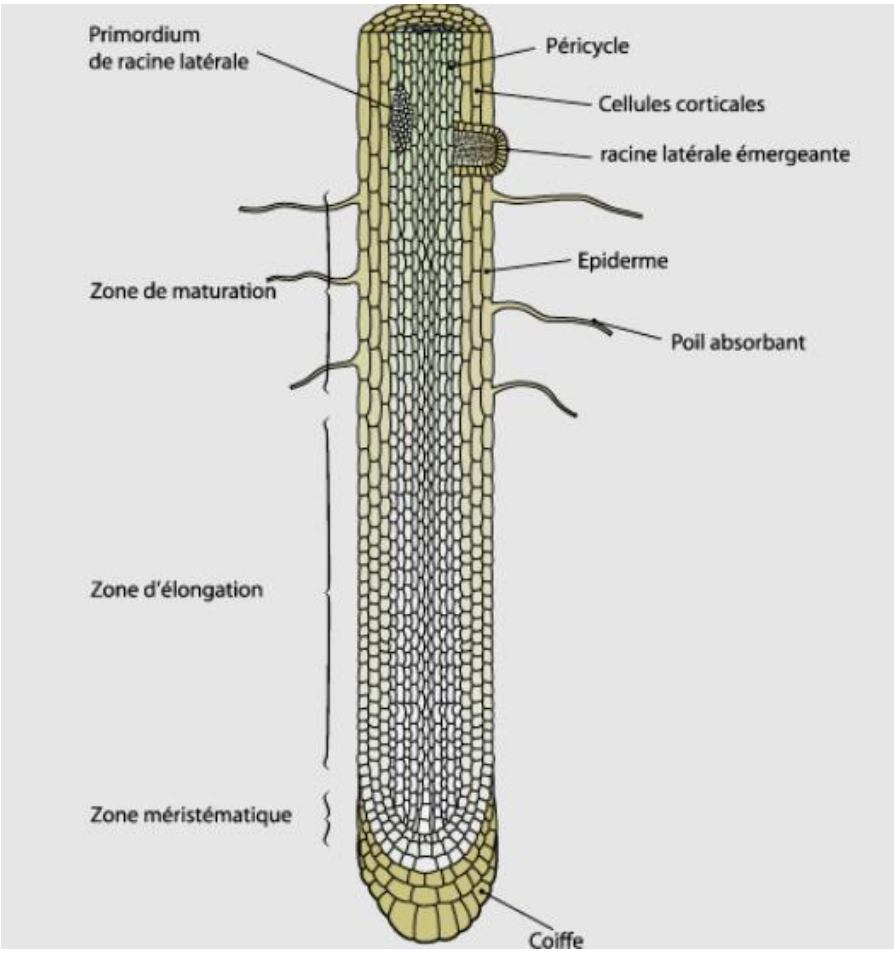


Figure 15: Méristème racinaire

1.2. Méristèmes secondaires

Si les méristèmes primaires sont à l'origine de la mise en place des tissus primaires, des méristèmes secondaires apparaîtront dans ces structures primaires. Dénommés cambiums, ils sont à l'origine de tissus secondaires, appelés formations secondaires. Elles permettent la croissance en épaisseur de certaines Cormophytes. Les Bryophytes et les Angiospermes Monocotylédones n'en possèdent pas. Dans les plantes on trouve deux méristèmes secondaires qui se différencient tardivement.

1. La zone génératrice libéro-ligneuse, (cambium vasculaire), responsable de la formation du xylème secondaire (le bois) et du phloème secondaire (le liber).

2. La zone génératrice subéro-phéllodermique (cambium de liège), responsable de la formation de liège et de phelloderme.

1.2.1 Cambium vasculaire

Le cambium vasculaire, souvent appelé simplement cambium, produit des tissus secondaires qui fonctionnent principalement comme support et conduction. Le cambium, qui s'étend sur toute la longueur des racines et des tiges des plantes vivaces et de nombreuses plantes annuelles, se présente sous la forme d'un mince cylindre de cellules pour la plupart en forme de brique. Le cylindre cambial se ramifie souvent, sauf aux extrémités, et les tissus qu'il produit sont responsables de l'essentiel de l'augmentation en épaisseur d'une plante à mesure qu'elle grandit. Les cellules individuelles restantes du cambium sont appelées initiales, tandis que leurs cellules sœurs sont appelées dérivées (Figure 16).

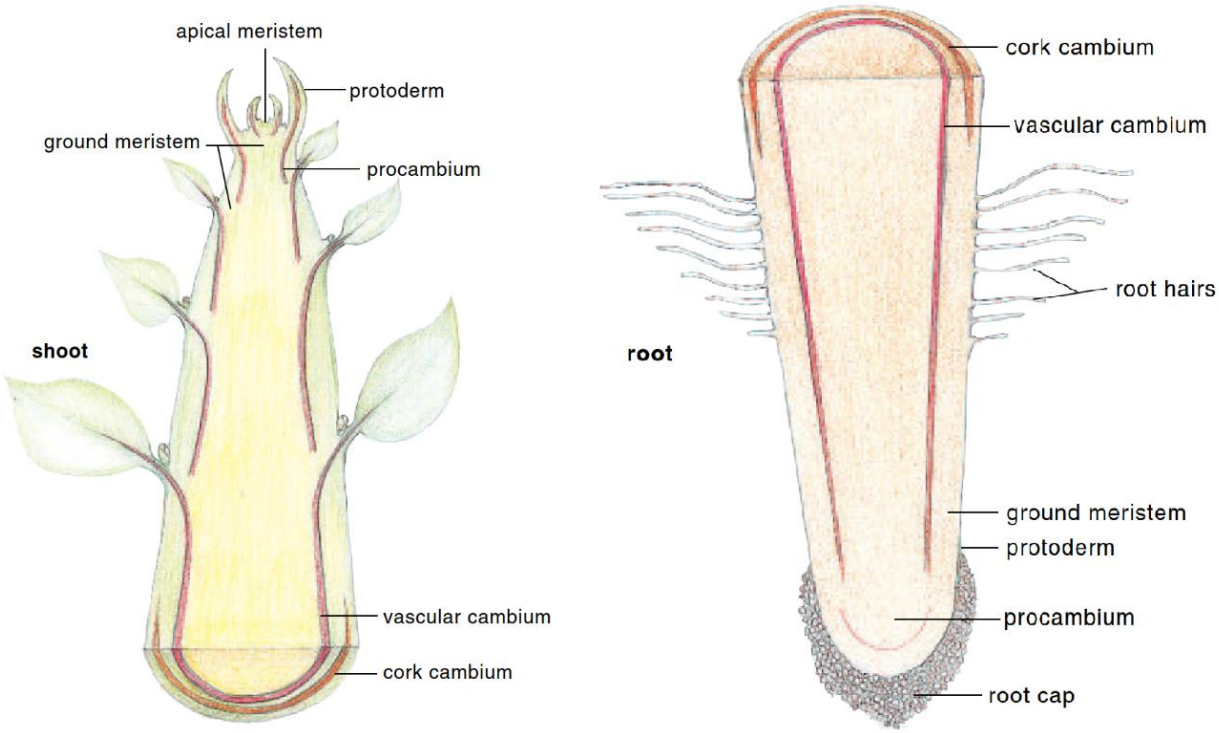


Figure 16: Méristème apical et latéral (primaire et secondaire)

1.2.2 Cambium du liège

Le cambium du liège (**Phellogène**), comme le cambium vasculaire, se présente sous la forme d'un mince cylindre qui s'étend le long des racines et des tiges des plantes ligneuses. Il se trouve à l'extérieur du cambium vasculaire, juste à l'intérieur de l'écorce externe qu'il produit. Les tissus déposés par le cambium

vasculaire et le cambium-liège sont appelés tissus secondaires, car ils sont produits après la maturation des tissus primaires (Figure 17).

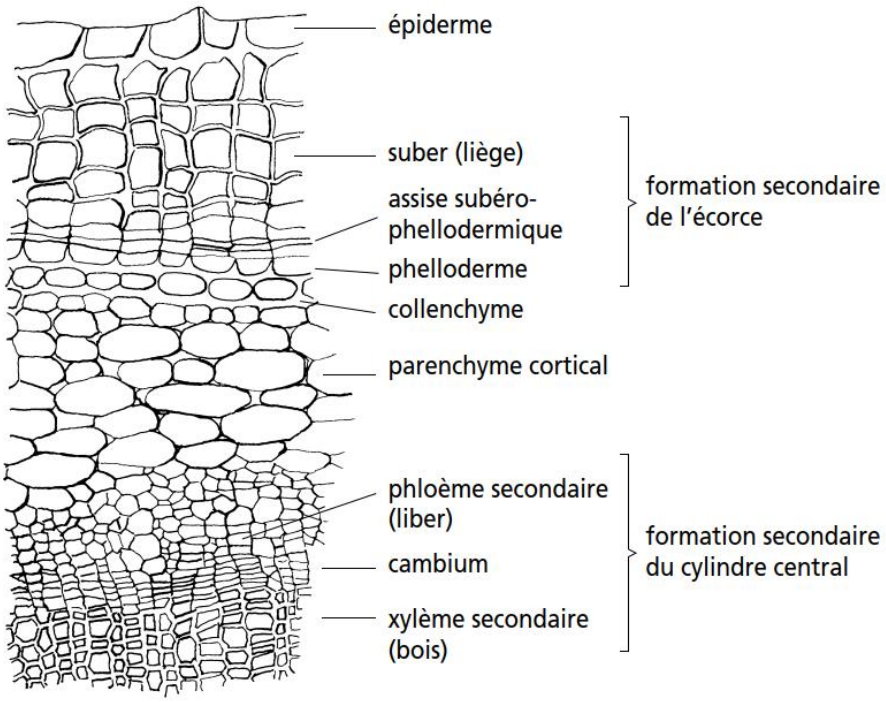


Figure 17: Coupe transversale de la tige d'une plante ligneuse

1.3. Méristèmes intercalaires

Les graminées et les plantes similaires n'ont ni cambium vasculaire ni cambium liège. Ils possèdent cependant des méristèmes apicaux et, à proximité des nœuds (zones d'attache des feuilles), d'autres tissus méristématiques appelés méristèmes intercalaires. Les méristèmes intercalaires se développent à intervalles le long des tiges, où, comme les tissus produits par les méristèmes apicaux, leurs tissus s'ajoutent à la longueur de la tige (Figure 18).

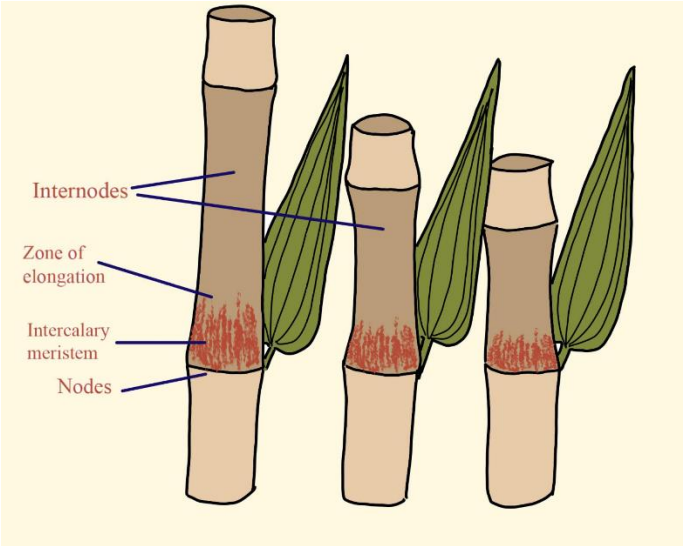


Figure 18: Méristème intercalaire

2. Tissu de remplissage (Parenchyme)

Le tissu parenchymateux est composé de cellules parenchymateuses (Figure 19), qui constituent le type de cellule le plus abondant et se trouvent dans presque toutes les parties principales des plantes supérieures. Ils ont une forme plus ou moins sphérique lors de leur première production, mais lorsque toutes les cellules du parenchyme se poussent les unes contre les autres, leurs parois fines et souples s'aplatissent aux points de contact. En conséquence, les cellules du parenchyme prennent différentes formes et tailles. Ils ont tendance à avoir de grandes vacuoles et peuvent contenir des grains d'amidon, des huiles, des tanins (substances tannantes ou colorantes), des cristaux et diverses autres sécrétions.

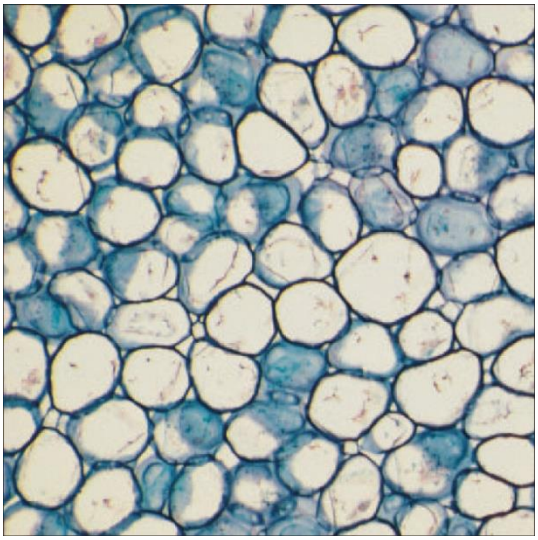


Figure 19: Tissu de parenchyme

- **Parenchyme aérifère**

Le plus souvent, les cellules du parenchyme sont séparées par des espaces ; en effet, chez les nénuphars et autres plantes aquatiques, les espaces intercellulaires sont assez étendus et forment un réseau dans toute la plante. Ce type de tissu parenchymateux, doté de vastes lacunes aériens connectés, est appelé **parenchyme aérifère**) (Figure 20).

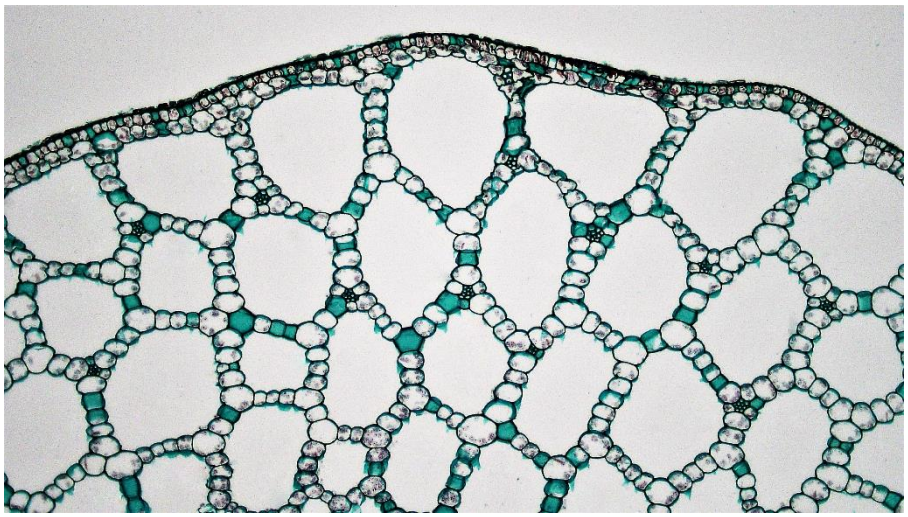


Figure 20: Parenchyme aérifère

Les cellules du parenchyme contenant de nombreux chloroplastes (que l'on trouve dans les feuilles) sont collectivement appelées tissu de **chlorenchyme** (**parenchyme chlorophyllien**). Les tissus du chlorenchyme fonctionnent principalement dans la photosynthèse, tandis que les tissus du parenchyme sans chloroplastes fonctionnent principalement dans le stockage de la nourriture ou de l'eau. Par exemple, les parties molles comestibles de la plupart des fruits et légumes sont constituées en grande partie de parenchyme (Figure 21).

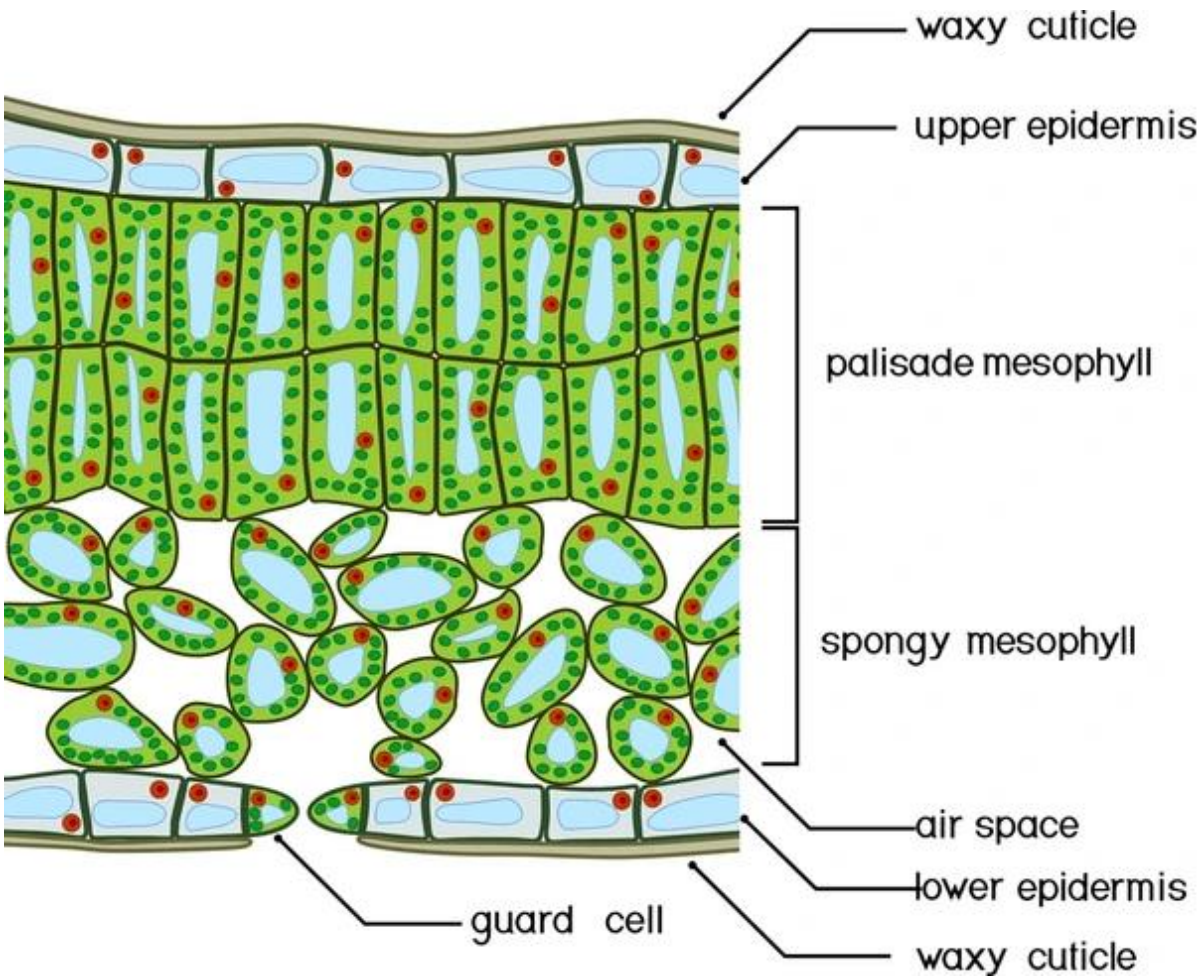


Figure 21: Parenchyme chlorophyllien

- **Parenchymes de réserve** : c'est du parenchyme à méats, situés plus profondément dans les organes. Ils reçoivent les composés élaborés par les parenchymes chlorophylliens, et une fois remaniés, ils sont accumulés dans ces parenchymes. Ces composés peuvent être des glucides ou des lipides. Ils sont localisés dans les organes souterrains (racines, rhizomes, tubercules et bulbes), les graines (albumen et cotylédons) et les tiges aériennes (cylindre central et moelle) (Figure 22).

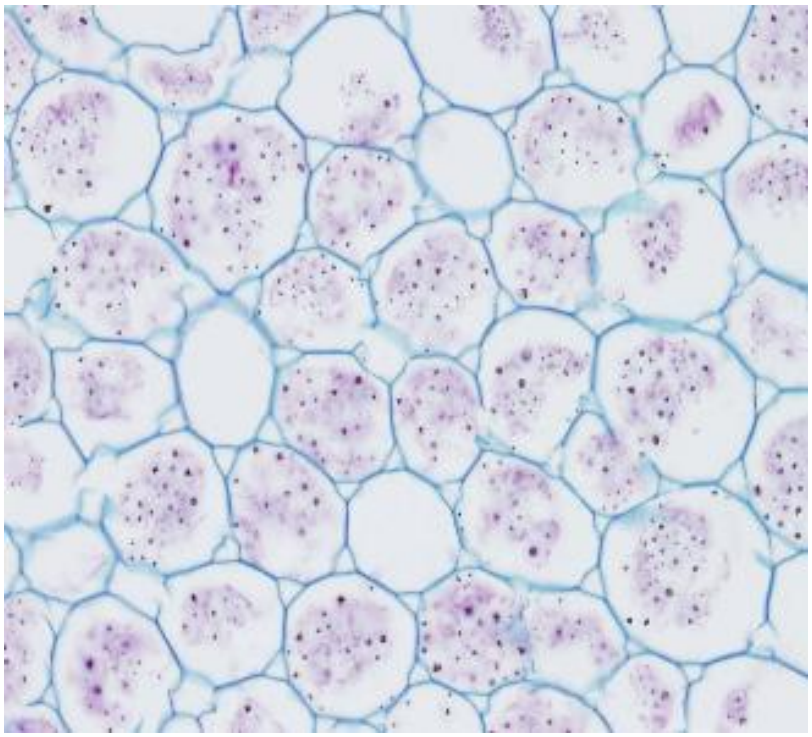


Figure 22: Parenchyme de réserve du cortex de la racine de renoncule (*Ranunculus repens*).

- **Parenchyme aquifère** : Parenchymes qui mettent en réserve de l'eau dans de grandes vacuoles. Les cellules sont grandes à méats. Ces parenchymes sont abondants dans les tiges et feuilles des plantes succulentes (plantes grasses). Certains végétaux utilisent l'eau mise en réserve pendant les périodes de sécheresse (Figure 23).

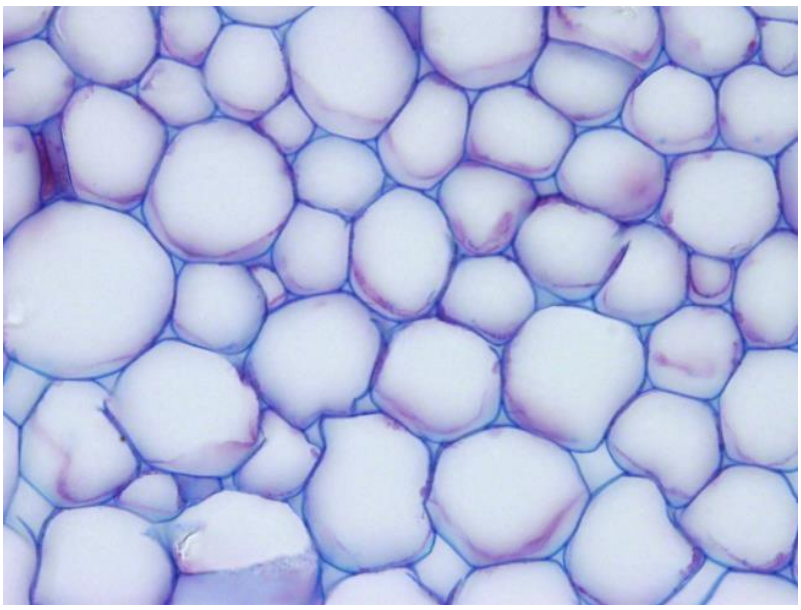


Figure 23: Parenchyme aquifère de tige de cactus

De nombreuses cellules du parenchyme vivent longtemps ; chez certains cactus, par exemple, ils peuvent vivre jusqu'à plus de 100 ans. Les cellules matures du parenchyme peuvent se diviser longtemps après avoir été produites par un méristème. En effet, lorsqu'on provoque la croissance d'une bouture (segment de tige), ce sont les cellules du parenchyme qui commencent à se diviser et donnent naissance à de nouvelles racines. Lorsqu'une plante est endommagée ou blessée, la capacité des cellules du parenchyme à se multiplier est particulièrement importante pour la réparation des tissus.

3. Tissus de revêtement (protection)

3.1. Épiderme

La couche de cellules la plus externe de tous les jeunes organes végétaux s'appelle l'épiderme. L'épiderme est principalement constitué de parenchyme ou de cellules apparentées au parenchyme, mais il comprend aussi souvent des cellules spécialisées impliquées dans le mouvement de l'eau et des gaz entrant et sortant des plantes, des glandes sécrétoires et de divers poils.

La plupart des cellules épidermiques sécrètent une substance grasse appelée **cutine** à l'intérieur et à la surface des parois externes. La cutine forme une couche protectrice appelée **cuticule** (Figure 24). L'épaisseur de la cuticule (ou, plus important encore, la cire sécrétée au-dessus de la cuticule par l'épiderme) détermine dans une large mesure la quantité d'eau perdue à travers les parois cellulaires par évaporation. La cuticule est également exceptionnellement résistante aux bactéries et à d'autres organismes pathogènes et a été récupérée à partir de plantes fossiles vieilles de plusieurs millions d'années. Les cires déposées sur la cuticule chez un certain nombre de plantes atteignent apparemment la surface par des canaux microscopiques dans les parois cellulaires. La sensibilité d'une plante aux herbicides peut dépendre de l'épaisseur de ces couches de cire. Certains gisements de cire sont suffisamment étendus pour avoir une valeur commerciale.

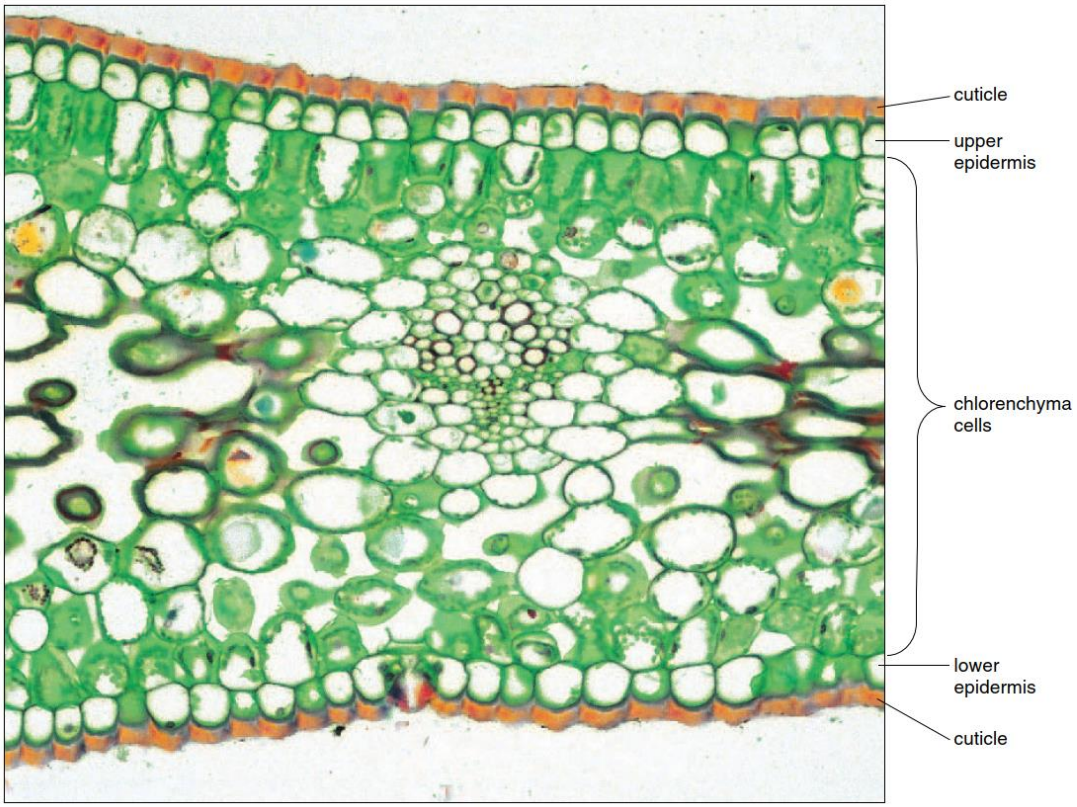


Figure 24: Une partie d'une coupe transversale d'une feuille de Clivia, montrant cuticule sécrétée par l'épiderme

Les cellules épidermiques des racines produisent des extensions tubulaires appelées **poils** (voir Figure 25) à une courte distance derrière les pointes en croissance. Les poils augmentent considérablement la surface absorbante de la surface. Des poils de nature différente apparaissent sur l'épiderme des parties aériennes des plantes. Ces poils forment des excroissances constituées d'une à plusieurs cellules.

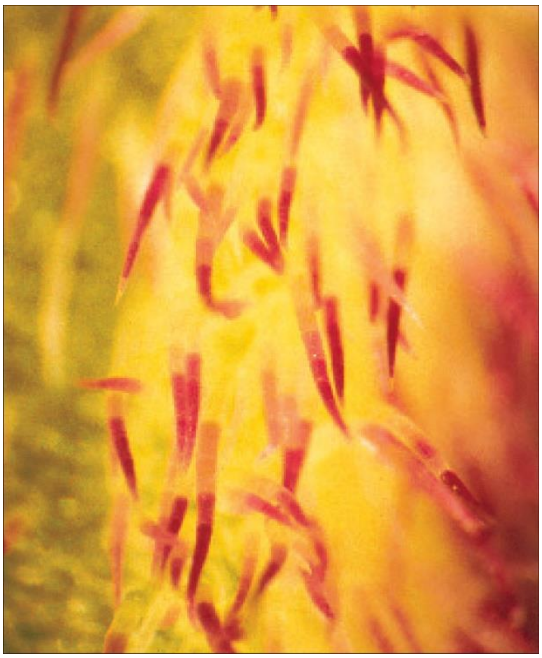


Figure 25: Poils à la surface d'une plante de menthe

Les feuilles possèdent également de nombreux petits pores, les **stomates**, bordés par des paires de cellules épidermiques spécialisées appelées cellules de garde (Figure 26). Les cellules de garde diffèrent par leur forme des autres cellules épidermiques ; ils diffèrent également par la présence de chloroplastes en leur sein. Certaines cellules épidermiques peuvent être modifiées en glandes qui sécrètent des substances protectrices ou autres, ou en poils qui réduisent la perte d'eau ou repoussent les insectes et les animaux qui pourraient autrement les consommer

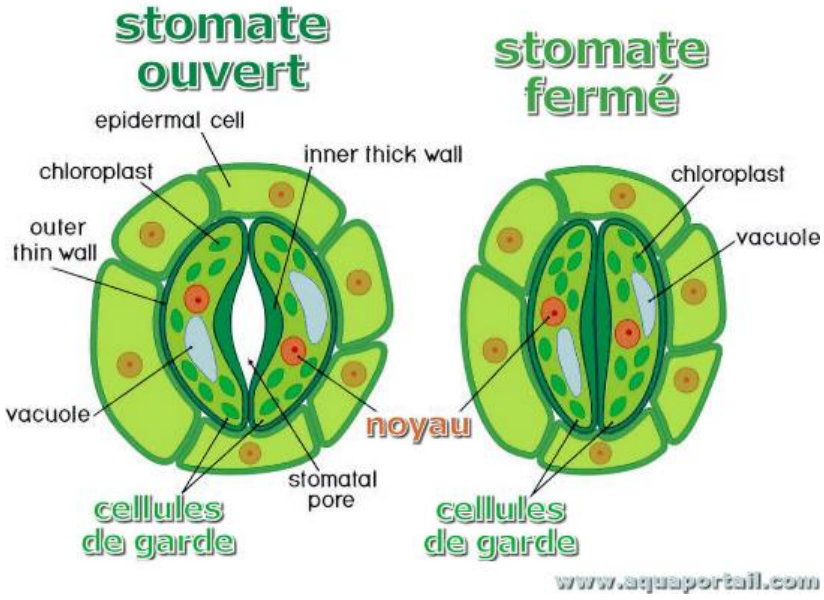


Figure 26: Structure d'un stomate

3.2. Périderme

Chez les plantes ligneuses, l'épiderme est éliminé et remplacé par un périderme après que le cambium de liège commence à produire de nouveaux tissus qui augmentent l'épaisseur de la tige ou de la racine. Le périderme constitue l'écorce externe et est principalement composé de cellules de suber (liège), qui sont mortes à maturité (voir Figure 27). Pendant que le cytoplasme des cellules du liège fonctionne encore, il sécrète dans les parois une substance grasse, la subérine. Cela rend les cellules du liège imperméables et les aide à protéger le phloème et les autres tissus sous l'écorce du dessèchement, des dommages mécaniques et des températures glaciales. Certains tissus de liège, comme ceux produits par le chêne-liège, sont récoltés commercialement et sont utilisés pour les bouchons de bouteilles et dans la fabrication de linoléum et de joints.

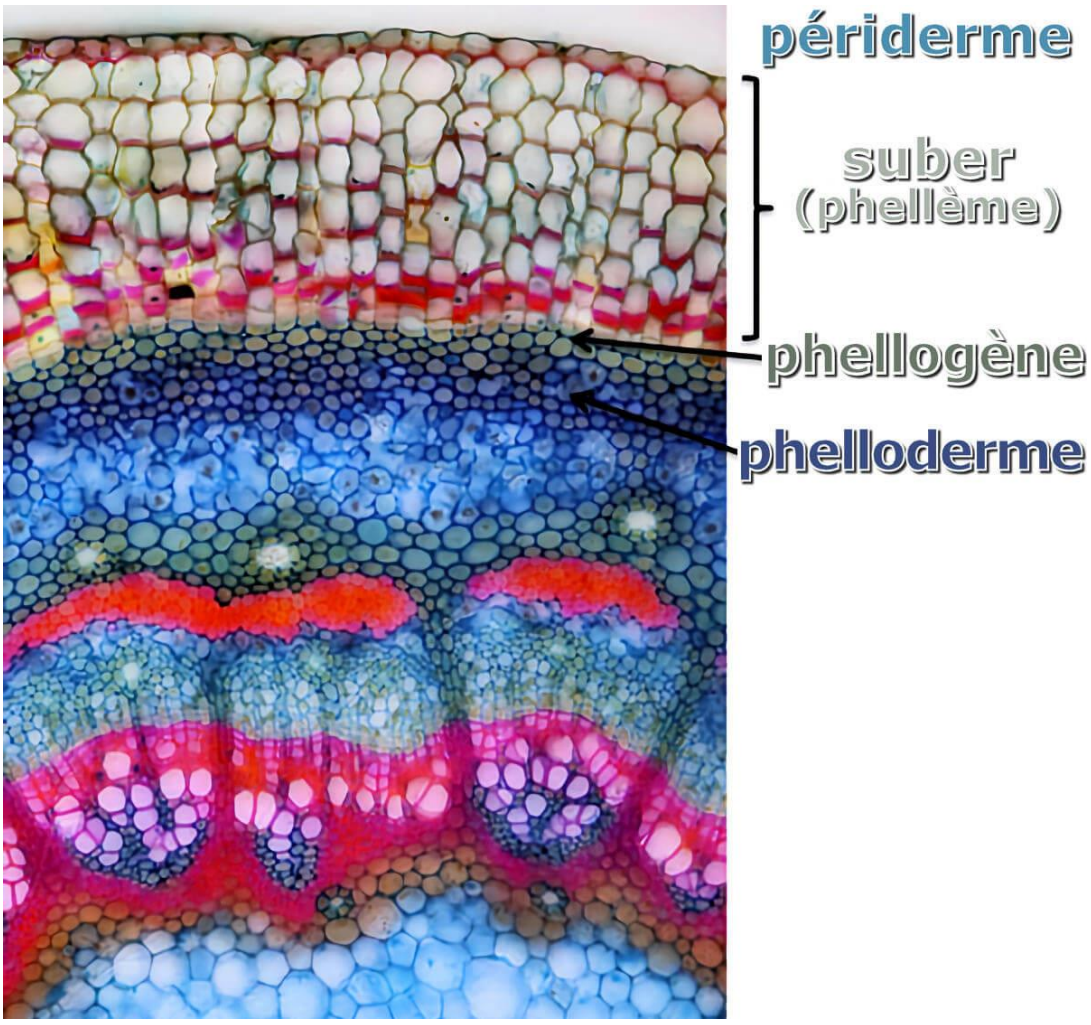


Figure 27: Périderme

Certaines parties d'un liège cambium forment des poches de cellules de parenchyme lâchement disposées qui ne sont pas imprégnées de subérine. Ces poches de tissu font saillie à travers la surface du périderme ; elles sont appelées **lenticelles** (Figure 28) et fonctionnent dans les échanges gazeux entre l'air et l'intérieur de la tige. Les fissures de l'écorce des arbres ont des lenticelles à leur base.

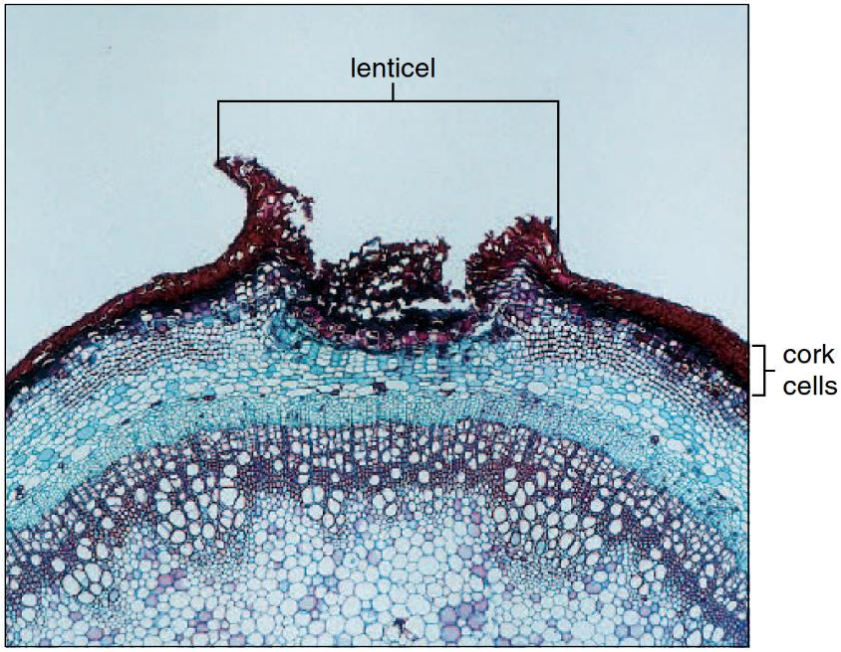


Figure 28 : Périderme et une lenticelle. Une coupe transversale d'une petite partie du périderme de sureau

4. Tissus de sécrétion

La sécrétion consiste en la fabrication de substances du métabolisme secondaire, non constantes dans tout le règne végétal, qui seront éliminées à l'extérieur du végétal par des appareils sécréteurs ou être accumulés au sein de leurs cellules. On distingue :

4.1. Les cellules sécrétrices

Toutes les cellules sécrètent certaines substances qui peuvent endommager le cytoplasme si elles s'accumulent en interne. Ces matériaux doivent soit être isolés du cytoplasme des cellules dont ils proviennent, soit être déplacés hors du corps végétal. Souvent, ces substances sont constituées de déchets qui ne sont plus d'aucune utilité pour la plante, mais certaines substances, telles que le nectar, les parfums et les hormones végétales, sont vitales au fonctionnement normal de la plante.

Les cellules sécrétrices peuvent fonctionner individuellement ou en tant que partie d'un tissu sécrétoire. Les cellules ou tissus sécrétoires, qui dérivent souvent du parenchyme, peuvent être présents dans une grande variété d'endroits dans une plante. Parmi les tissus sécrétoires les plus courants figurent ceux qui sécrètent le nectar des fleurs ; des huiles d'agrumes, de menthe et de nombreuses autres feuilles ; mucilage dans les poils glandulaires des droséras et autres plantes piégeuses d'insectes ; le latex dans les membres de plusieurs familles de plantes, comme la famille Euphorbe ; et les résines des conifères, comme les pins. Le latex et les résines sont généralement sécrétés par les cellules tapissant des conduits tubulaires qui forment des réseaux dans certaines espèces végétales (Figure 29). Certaines sécrétions végétales, comme la résine de pin, le caoutchouc, l'huile de menthe et l'opium, ont une valeur commerciale considérable.

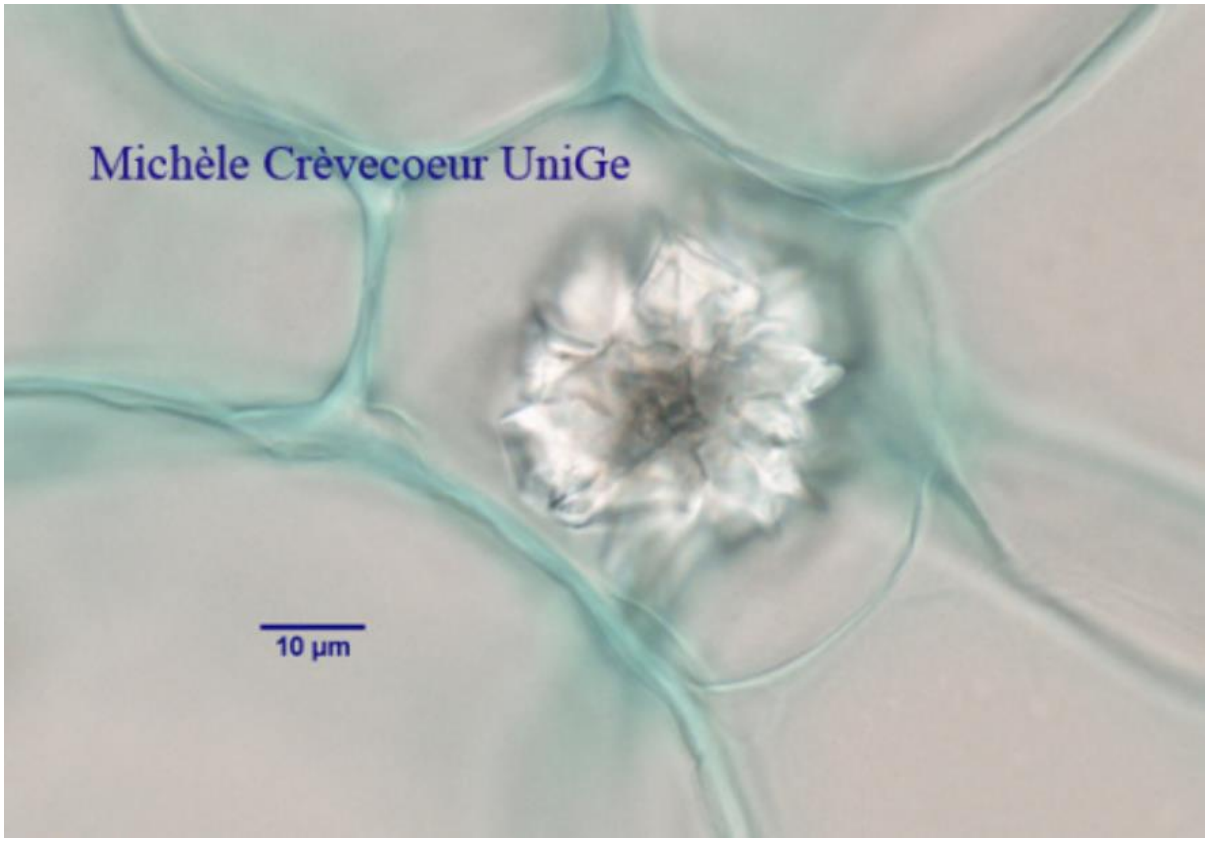


Figure 29: Cellules secrétrices du parenchyme cortical

4.2. Les canaux sécréteurs : qui sont des cavités allongés, tubuliformes orientés dans le sens de la longueur de l'organe, limités par une ou deux couches de petites cellules sécrétrices très régulièrement disposées (Figure 30).

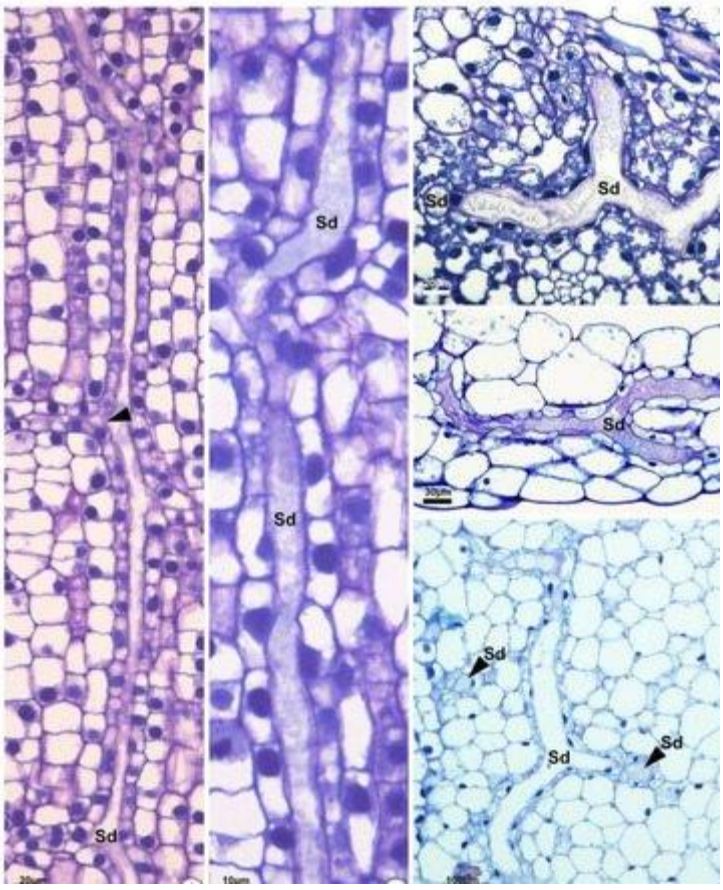


Figure 30: Structure des canaux sécrétoires de différentes plantes

4.3. Les poches sécrétrices : sont des cavités sphériques contenant une essence située également dans le parenchyme et bordées de cellules sécrétrices, sont nombreuses dans le péricarpe des agrumes : oranges, mandarines, citrons…. (Figure 31).

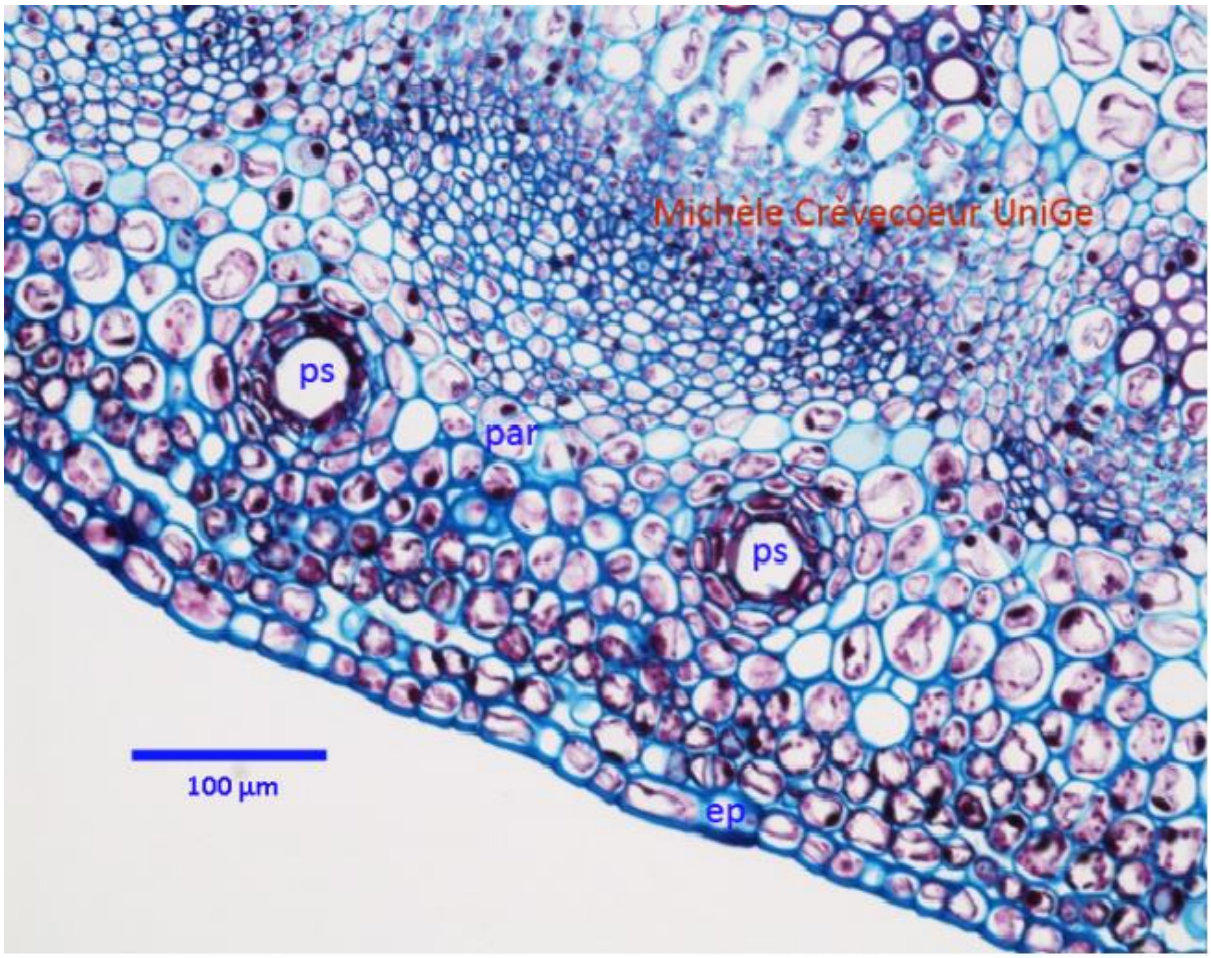


Figure 31: Poches sécrétrices (tige d'estragon)

5. Tissus conducteurs

Les systèmes vasculaires des plantes sont très différents de ceux des animaux. Le système vasculaire végétal n'est pas un système circulatoire : l'eau et les minéraux pénètrent dans le xylème par les racines et sont conduits vers le haut vers les feuilles et les tiges. Lors de son passage, la majeure partie de l'eau s'évapore de la surface des tiges, des feuilles et des fleurs et est perdue ; les minéraux et un peu d'eau sont utilisés par les cellules environnantes.

Les cellules du phloème sont vivantes ; ils récupèrent le sucre dans les zones où il est abondant, généralement les feuilles en été et les tubercules ou les rhizomes au printemps, et le transportent vers les zones où le sucre est nécessaire, en particulier les pointes des pousses, des racines, des jeunes feuilles et des fleurs. Au cours des derniers mois de l'été, le phloème transporte le sucre vers les fruits en développement et vers les organes de stockage des plantes vivaces. Le sucre doit être dissous pour être transporté, l'eau est transportée simultanément dans le phloème.

La coupe transversale d'une tige non ligneuse a permis de voir les tissus conducteurs. Ils forment de petits paquets appelés faisceaux criblovasculaires. Chacun est constitué par du xylème externe et du phloème interne. Ces deux tissus sont séparés par un cambium libéro-ligneux donnant le liber vers le phloème et le bois vers le xylème. Chacune des deux parties du faisceau vasculaire contient des éléments conducteurs. Ceux coté xylème sont constitués par deux types de cellules spécialisées : les vaisseaux et les trachéïdes (sont des types de sclérenchyme). Ceux du côté du phloème sont des tubes criblés.

5.1. Xylème

Les vaisseaux (souvent aussi appelées trachées) sont faits de rangées de cellules alignées qui se soudent bout à bout au cours de leur développement. Les parois transversales disparaissent pour former une sorte de tube qui constitue un excellent canal conducteur d'eau pouvant avoir plusieurs mètres de longueur et au moins 30 mm de diamètre. Les parois des vaisseaux sont renforcées par des épaississements de forme ; annelés, spiralés, rayés, scalariformes, réticulés, ponctués … selon le dépôt de la lignine sur les parois latérales (Figure 32)

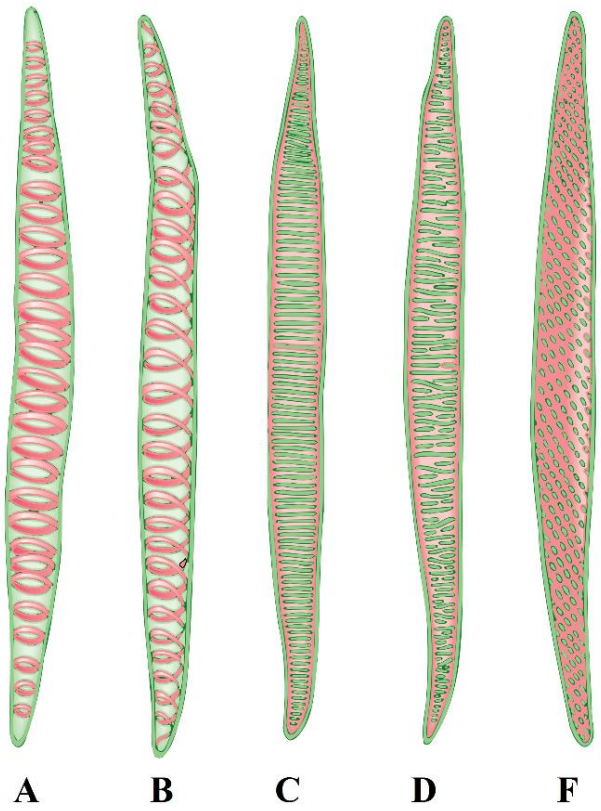


Figure 32: Différents types d'épaississements dans les parois des vaisseaux, A : Annelé, B : Spiralé, C : Rayé, D : Réticulé, F : Ponctué

Les trachéides ressemblent aux vaisseaux mais sont constituées par des cellules mortes dotées d'une paroi transversale. Elles sont beaucoup plus courtes que les trachées puisqu'elles ne dépassent pas 0,3 à 10 mm de long même si leur diamètre est identique. Une fois mises en place, trachées et trachéides perdent leur noyau et leur contenu cellulaire normal. Ce sont des cellules mortes, incapables d'évoluer ou de se transformer (Figure 33).

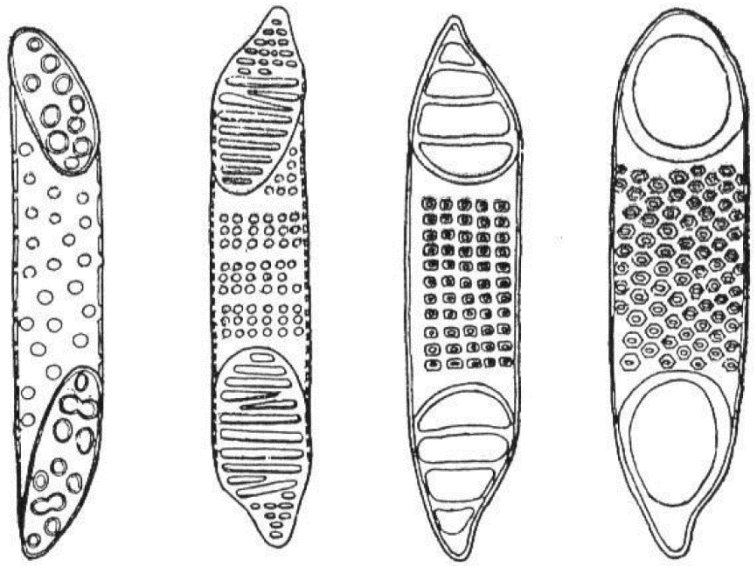


Figure 33: Trachéides

Toutes les parois des vaisseaux sont perforées. Ce sont des ponctuations. Elles se forment dans la paroi cellulaire là où, il n'y a pas d'épaississement secondaire de la paroi. Ce sont donc des pores dans la paroi cellulaire. Chez les Angiospermes ces ponctuations sont particulièrement grandes et simples tandis que les ponctuations des trachéïdes chez les Gymnospermes sont beaucoup plus complexes. Dans cette structure appelée ponctuation aréolée (Figure 34) les parois secondaires de deux cellules voisines forment une ceinture délimitant une cavité centrale (les pores).

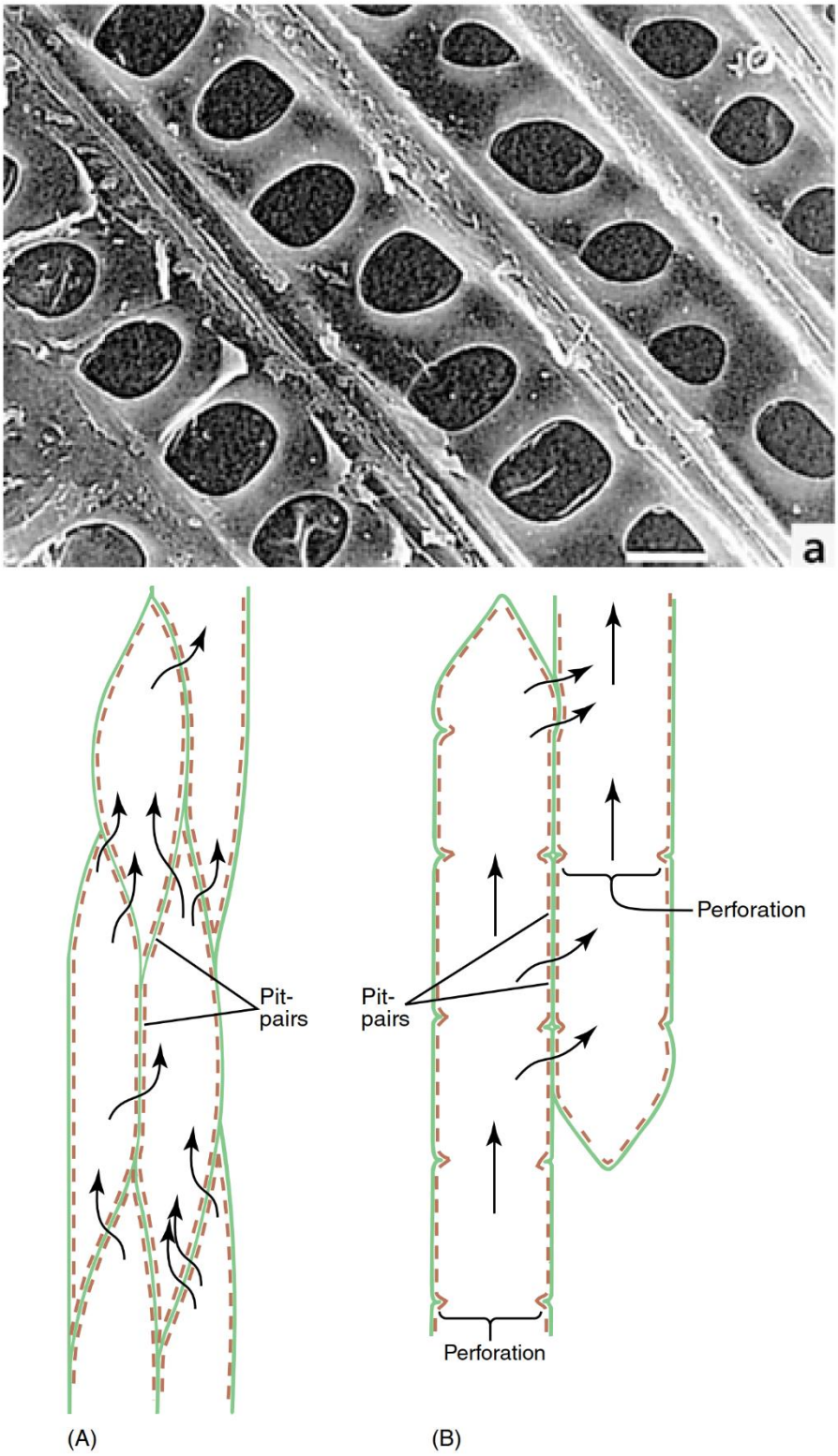


Figure 34 : a) Microphotographies obtenues en microscopie électronique (champ de croisement avec pores chez *Podocarpus andinus*)

(A) L'eau passe entre les trachéides uniquement à travers des pores. À l'exception des plasmodesmes (qui sont trop petits pour jouer un rôle important dans la conduction de l'eau), aucun trou n'est présent dans les parois

primaires des trachéides. (B) L'eau peut passer entre les éléments du vaisseau à travers des perforations, mais elle ne peut passer d'un vaisseau à l'autre que par des paires de pores. Les vaisseaux sont longs, mais pas aussi longs qu'une plante entière, et l'eau doit donc passer d'un vaisseau à l'autre à mesure qu'elle monte des racines aux tiges puis aux feuilles. Vert = paroi primaire ; marron = paroi secondaire.

5.2. Phloème

Les tubes criblés sont aussi des cellules allongées, placées bout à bout, mais leurs parois transversales sont perforées (Figure 35), si bien que l'eau peut circuler d'un élément à un autre. Les tubes criblés ne s'épaississent pas longitudinalement et restent vivants, (pourtant le noyau cellulaire régresse ainsi que le tonoplaste) durant une période de végétation. Chez les plantes pluriannuelles ils sont renouvelés chaque année. Les tubes criblés sont entourés de cellules compagnes qui assurent les échanges des assimilats avec les tubes criblés. Ces transports sont actifs, donc consommateurs d'énergie.

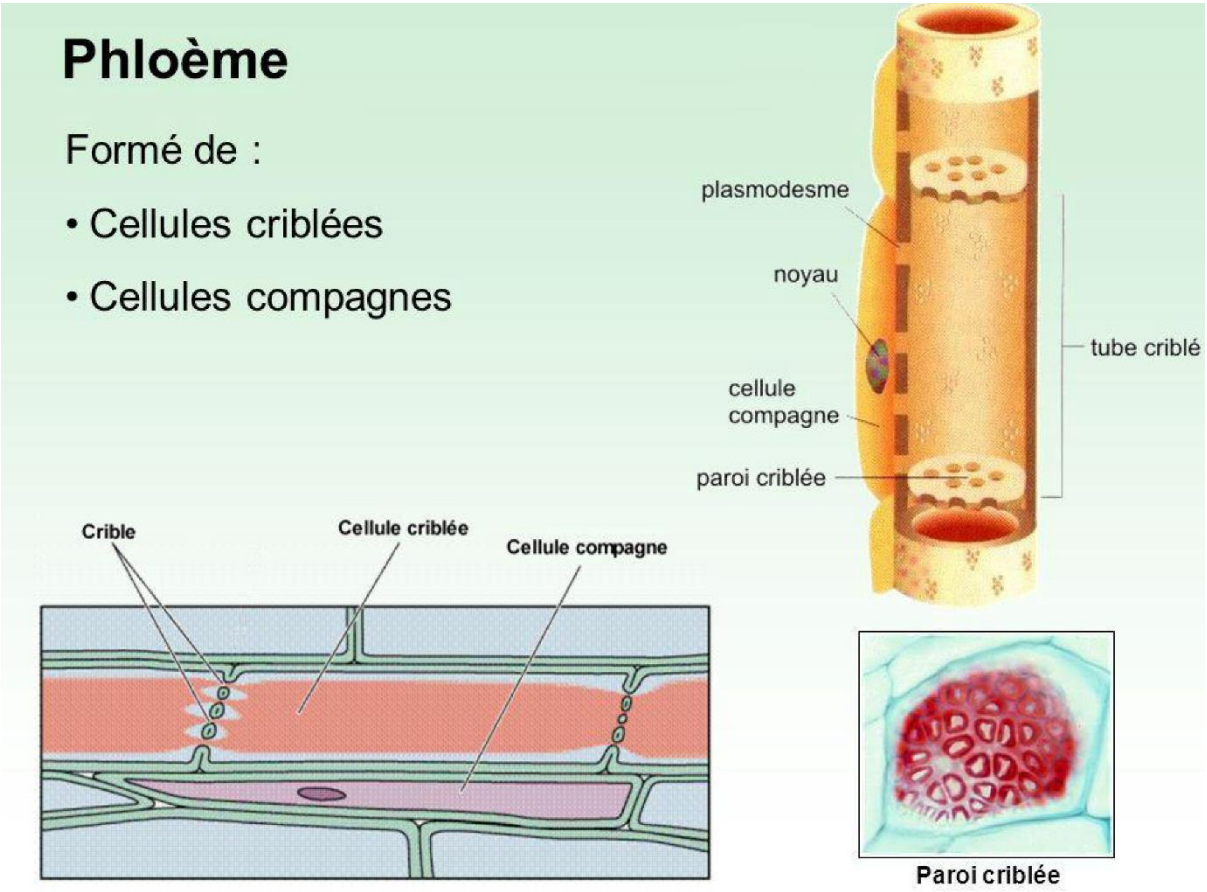


Figure 35: Phloéme

6. Tissu de soutien

6.1. Collenchyme

Les cellules du collenchyme (Figure 36), comme les cellules du parenchyme, ont un cytoplasme vivant et peuvent rester vivantes longtemps. Leurs parois sont généralement plus épaisses et d'épaisseur plus inégale que celles des cellules du parenchyme. Les cellules de collenchyme se trouvent souvent juste sous l'épiderme (Figure 37) ; généralement, ils sont plus longs que larges et leurs parois sont à la fois souples et solides. Ils fournissent un support flexible à la fois aux organes en croissance et aux organes matures, tels que les feuilles et les parties des fleurs. Comme l'argile, la paroi du collenchyme présente une plasticité, c'est-à-dire la capacité à se déformer sous l'effet d'une pression ou d'une tension et à conserver sa nouvelle forme même si la pression ou la tension cesse. Le collenchyme est présent dans les extrémités des pousses allongées qui doivent être longues et flexibles, comme celles des plantes grimpantes comme le raisin. Il est présent sous forme de couche juste sous l'épiderme ou sous forme de bandes situées à côté des faisceaux vasculaires, rendant les pointes plus solides et plus résistantes à la rupture ; cependant, les pointes peuvent encore s'allonger car le collenchyme peut être étiré.

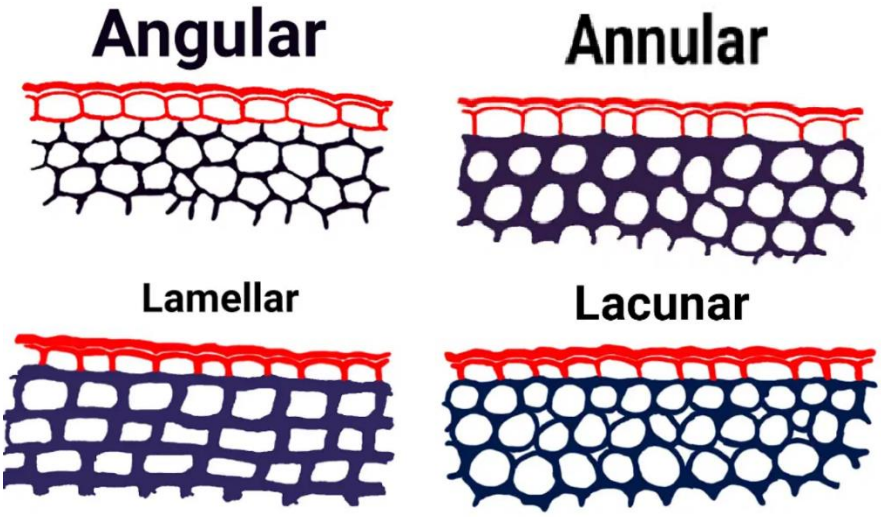


Figure 36: Les différents formes de cellules du collenchyme

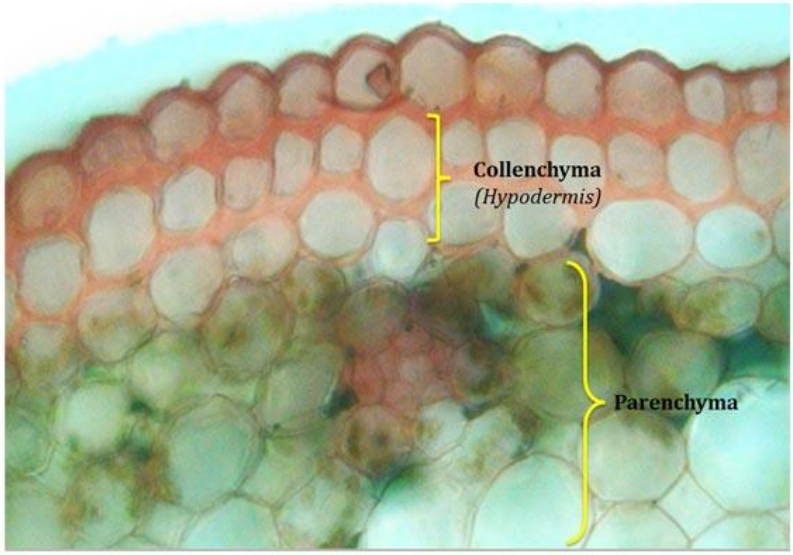


Figure 37: Collenchyme

Chez les espèces dont les extrémités des pousses sont composées uniquement de parenchyme faible, les extrémités sont flexibles et délicates et peuvent souvent être endommagées par le vent ; la partie allongée doit être très courte, sinon elle se déforme simplement sous son propre poids.

Les cellules du parenchyme sont nécessaires dans les tissus internes pour leur soutien. Le collenchyme et le parenchyme turgescent fonctionnent ensemble comme la pression de l'air et un pneu : le pneu ou la chambre à air est extrêmement solide mais est inutile pour un support sans pression d'air. Les parois cellulaires du collenchyme étant épaisses, elles nécessitent plus de glucose pour leur production. Le collenchyme est généralement produit uniquement dans les extrémités des pousses et les jeunes pétioles, où le besoin de résistance supplémentaire justifie le coût métabolique. Les pousses et les racines souterraines n'ont pas besoin de collenchyme car le sol fournit un support, mais les racines aériennes des épiphytes telles que les orchidées et les philodendrons ont une épaisse couche de collenchyme.

6.2. Sclérenchyme

Le tissu du sclérenchyme est constitué de cellules dotées de parois secondaires épaisses et résistantes, qui sont presque toujours lignifiées. La plupart des cellules du sclérenchyme sont mortes à maturité et fonctionnent comme support. Les cellules de sclérenchyme se développent à partir des cellules du parenchyme dans les organes matures après avoir cessé de croître et atteint leur taille et leur forme appropriées. Contrairement au collenchyme, le

sclérenchyme soutient la plante par sa seule force ; si l'on laisse les tiges riches en sclérenchyme se flétrir, elles restent droites et ne s'affaissent pas

Il existe deux formes de sclérenchyme : les **scléréides** et les **fibres**.

Les scléréides (Figure 38) qui sont courtes, peuvent être réparties de manière aléatoire dans d'autres tissus. Par exemple, la texture légèrement granuleuse des poires est due à la présence de groupes de scléréides, ou cellules pierreuses, comme on les appelle parfois. La dureté des coquilles de noix et des noyaux des pêches et autres fruits à noyau est due aux scléréides. Les scléréides ont tendance à être aussi longues que larges et se trouvent parfois dans des zones spécifiques (par exemple, les marges des feuilles de camélia) plutôt que d'être dispersées dans d'autres tissus.

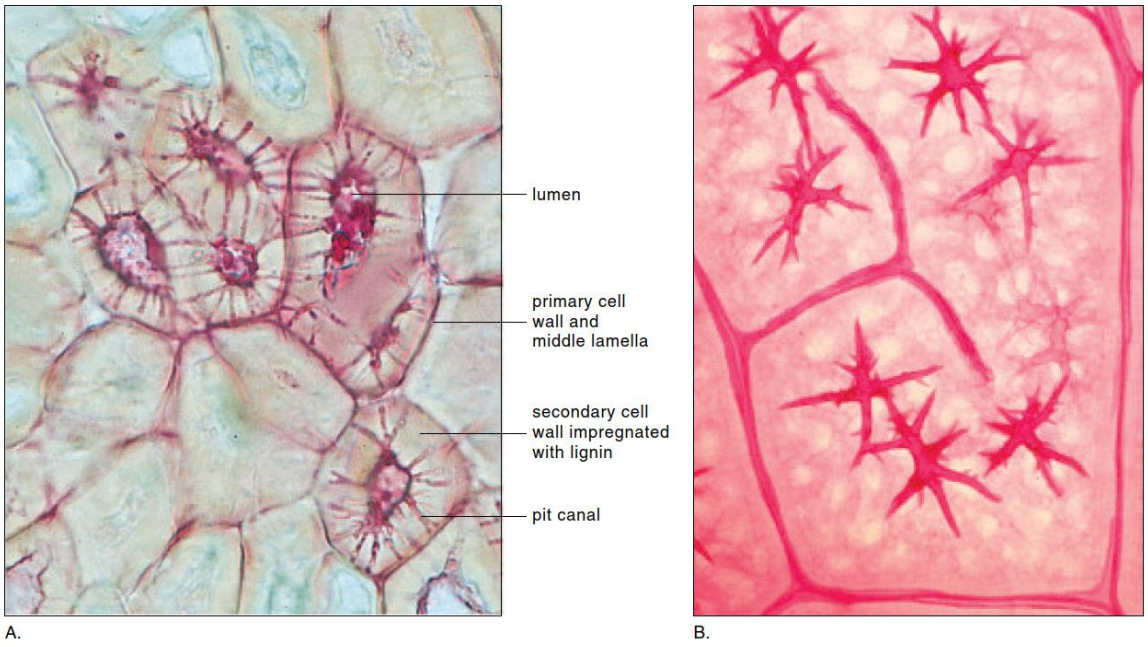


Figure 38: A. Scléréides (cellules pierreuses) d'une poire en coupe transversale. B. Scléréides dans la feuille d'un arbre aux roues (*Trochodendron aralioides*)

Les fibres (Figure 39) qui sont longues peuvent être trouvées en association avec un certain nombre de tissus différents dans les racines, les tiges, les feuilles et les fruits. Ils sont généralement beaucoup plus longs que larges et possèdent une cavité proportionnellement petite au centre de la cellule. Parce que les fibres sont longues, elles sont flexibles et se trouvent le plus souvent dans les zones où la résistance et la flexibilité sont importantes. Le bois de la plupart des plantes à fleurs contient des fibres abondantes et leur résistance soutient l'arbre tandis que leur élasticité permet au tronc et aux branches de se balancer

au vent sans se briser (généralement) ni se plier de façon permanente. L'écorce riche en fibres résiste aux insectes, champignons et autres ravageurs

À l'heure actuelle, des fibres provenant de plus de 40 familles différentes de plantes sont utilisées commercialement dans la fabrication de produits textiles, de cordes, de ficelles, de toiles et de produits similaires.

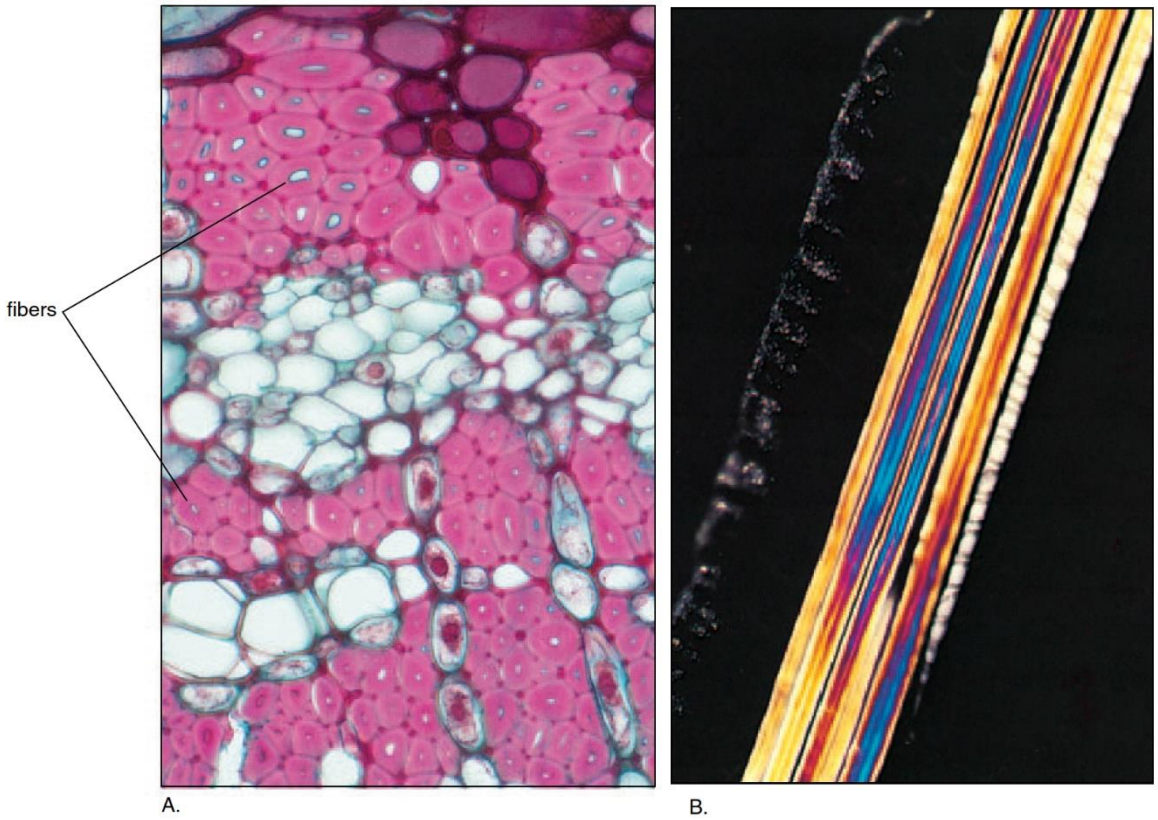


Figure 39: Fibres. A. Une coupe transversale d'une portion de tissu de tige d'un tilleul (*Tilia sp*.). Remarquez l'épaisseur des parois des fibres plus sombres. B. Une coupe longitudinale des fibres d'une feuille de Welwitschia.

CHAPITRE 3

ANATOMIE ET MORPHOLOGIE DES ORGANES VÉGÉTAUX

Chapitre 3 : Anatomie et morphologie des organes végétaux

1. Racine

1.1. Fonctions fondamentales et morphologie des racines

Les racines remplissent trois fonctions essentielles : assurer l'ancrage de la plante au sol, absorber l'eau et les nutriments, et produire des hormones régulatrices de croissance. Cet ancrage garantit la stabilité nécessaire à la plante, permettant aux organes aériens (tiges, feuilles, fleurs, fruits) de s'orienter correctement vers la lumière, les pollinisateurs ou les agents de dispersion. Sans cette fixation, les arbres et arbustes ne tiendraient pas debout, et les épiphytes seraient facilement emportés par le vent. Même chez les plantes à tiges ramifiées, comme celles se développant via des rhizomes ou des stolons, les racines restent indispensables à la stabilité.

Dès la germination, la radicule, première racine issue de l'embryon, pousse pour former le système racinaire initial. Cette radicule peut devenir une racine pivotante épaisse, de laquelle émergent des racines secondaires plus fines. Alternativement, des racines adventives peuvent se développer à partir des tissus de la tige ou des feuilles, donnant naissance à un système fasciculé constitué de nombreuses racines fines de diamètre similaire (Figure 40, 41). Ce double système (pivotant + fasciculé) est fréquent chez les plantes matures et optimise leur adaptation aux conditions du sol.

La forme cylindrique des racines maximise leur capacité d'absorption sur toute leur surface, ce qui leur permet de pénétrer efficacement différents types de sols, qu'ils soient compacts ou poreux. Les feuilles, exposées à la lumière, captent celle-ci principalement par leur face supérieure et limitent la perte d'eau grâce à un rapport surface/volume plus faible.

Les racines produisent également des hormones telles que les cytokinines et les gibbérellines, qui régulent la croissance des pousses en équilibrant la transpiration des feuilles avec l'absorption racinaire, optimisant ainsi l'utilisation des ressources de la plante.

Certaines racines sont spécialisées pour des fonctions particulières : racines charnues pour le stockage de réserves (carottes, betteraves), racines horizontales formant des bourgeons pour la reproduction végétative (saules, oseilles), racines épineuses (palmiers), racines adhérentes facilitant l'accroche (lierre), ou racines modifiées en organes parasitaires (gui, cuscute).

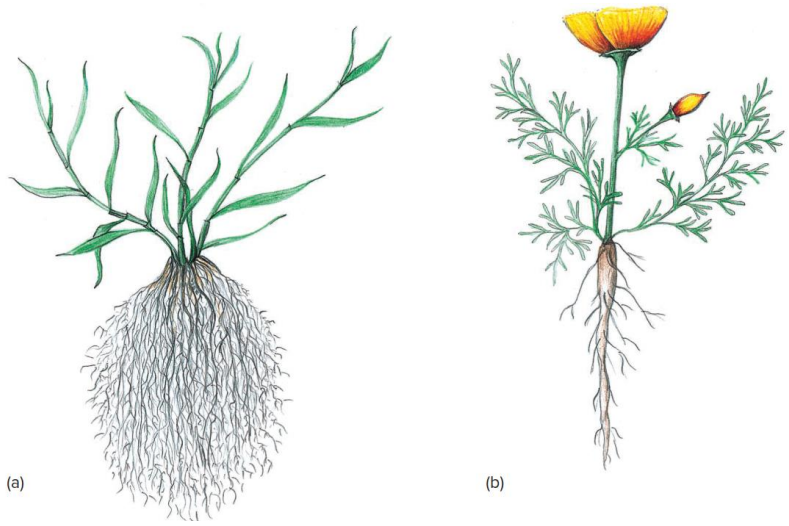


Figure 40 : Systèmes racinaires : (a) Système fasciculé d'une graminée, (b) système pivotant d'une Eschscholtzia (pavot de Californie).

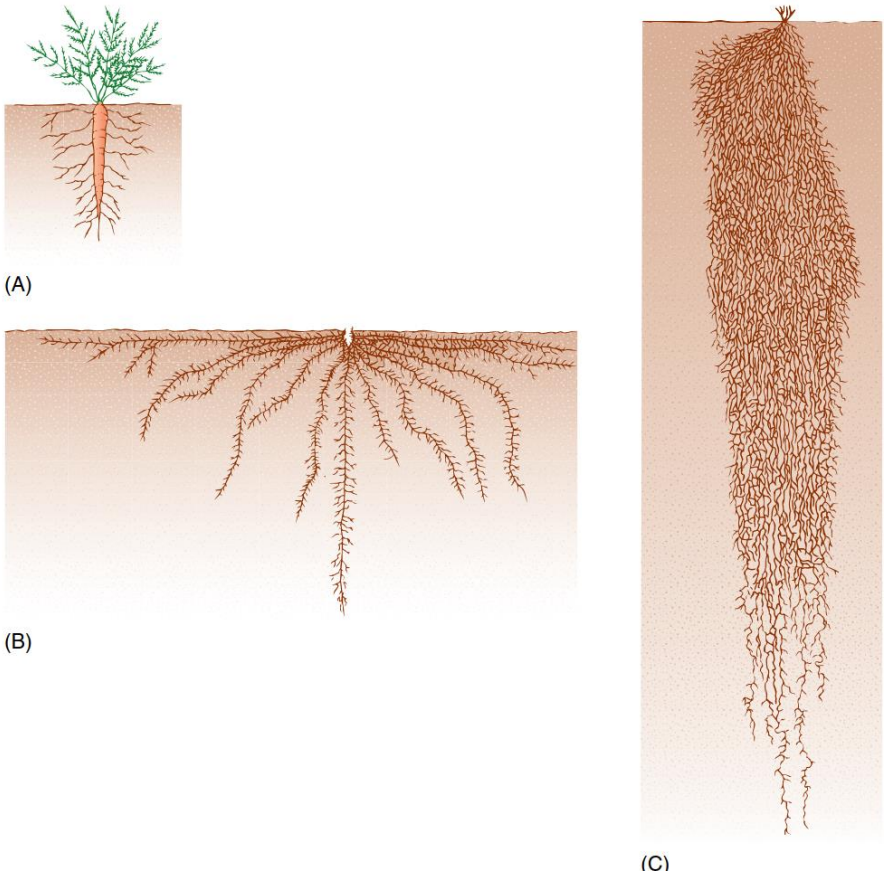


Figure 41 : Variations des racines pivotantes : (A) racine très épaissie (carotte), (B) racine pivotante comparable aux racines latérales (tournesol), (C) système fasciculé sans radicule (blé d'hiver).

1.2. Diversité des systèmes racinaires, croissance et adaptations chez les monocotylédones et dicotylédones

Une plante mature peut développer un réseau racinaire impressionnant. Par exemple, une ivraie vivace (ray-grass) peut posséder jusqu'à 15 millions de racines et ramifications, totalisant plusieurs centaines de kilomètres de longueur et une surface d'absorption supérieure à celle d'un terrain de volley-ball, concentrée dans un volume de sol très réduit. Les poils racinaires augmentent encore cette surface, facilitant l'absorption des ressources.

Les **dicotylédones** (plantes à deux cotylédons, comme les pois ou les carottes) possèdent généralement un système racinaire pivotant avec une racine primaire d'où naissent des racines secondaires. Les **monocotylédones** (un seul cotylédon, comme le maïs ou le riz) ont un système fasciculé issu principalement de racines adventives. Ces racines adventives sont également fréquentes chez les dicotylédones grimpantes ou à tiges spécialisées (rhizomes, bulbes).

Les racines latérales peuvent elles-mêmes produire d'autres racines, créant un réseau racinaire très ramifié. Certaines racines latérales peuvent s'épaissir, comme chez la patate douce ou le manioc.

Chez les plantes ligneuses pérennes, les racines subissent une croissance secondaire qui produit bois et écorce, renforçant ainsi la structure racinaire et augmentant sa capacité conductrice (Figure 42). Cette croissance secondaire permet une plus grande capacité à transporter eau et nutriments, favorisant le développement de feuilles et racines plus nombreuses.

En revanche, la plupart des monocotylédones ne réalisent pas de croissance secondaire ; leur capacité conductrice est donc limitée, ce qui restreint l'augmentation de taille des feuilles et des racines. Cependant, certaines monocotylédones peuvent croître via des stolons ou des rhizomes qui produisent des racines adventives, irrigant directement les nouvelles pousses et évitant ainsi la contrainte du transport via la tige principale (Figure 43).

La formation de racines adventives n'est pas exclusive aux monocotylédones : plusieurs dicotylédones les développent naturellement ou lors de la multiplication végétative par bouturage, méthode couramment exploitée en horticulture et agriculture.

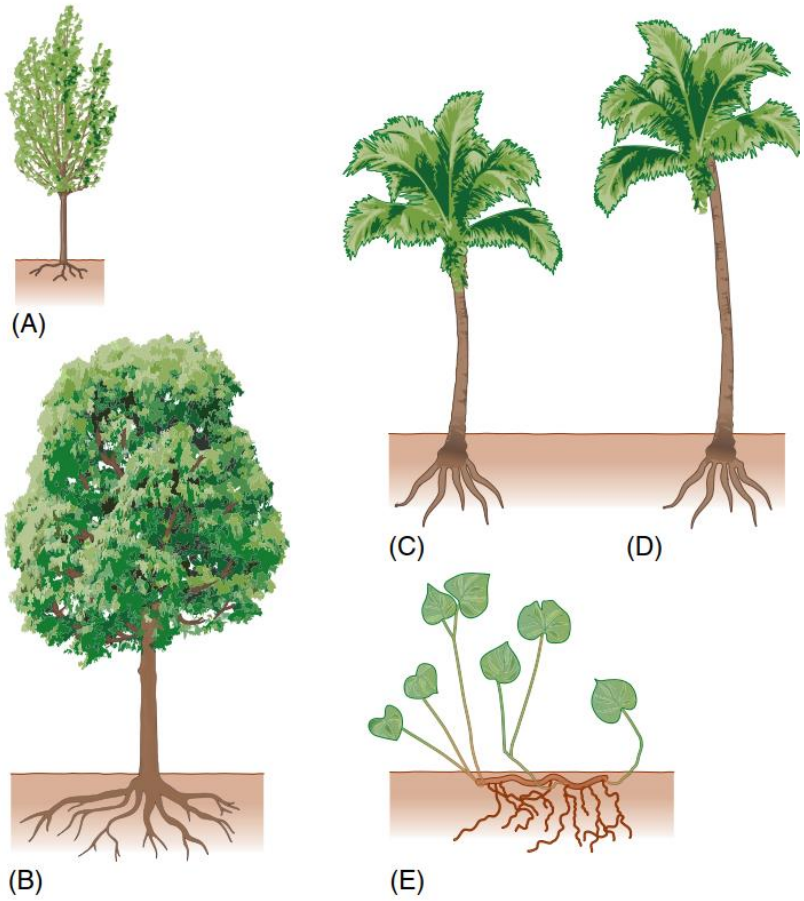


Figure 42: Croissance secondaire chez plantes ligneuses : (A-B) jeune et vieille plante ligneuse dicotylédone avec augmentation de capacité conductrice, (C-D) monocotylédones sans croissance secondaire, (E) racines adventives sur stolons contournant la limitation conductrice.



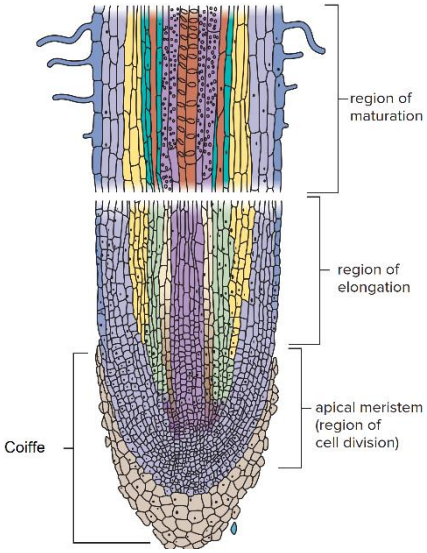
Figure 43: Cormes de glaïeul ; système racinaire fasciculé, la radicule disparaît rapidement après germination et les racines adventives se développent indépendamment.

1.3.Structure et fonctionnement des racines

1.3.1. Zones principales de la racine :

Une jeune racine en développement présente quatre grandes zones, dont les limites peuvent être parfois floues selon l'espèce :

- **La coiffe racinaire**
- **La zone de division cellulaire (méristème apical)**
- **La zone d'élongation**
- **La zone de maturation (ou différenciation)**



a) La coiffe racinaire

Située à l'extrémité de la racine (Figure 44), la coiffe est une masse de cellules parenchymateuses en forme de dé, qui protège les tissus délicats de la pointe lors de la pénétration dans le sol. Elle sécrète un mucigel, un gel lubrifiant facilitant le glissement de la racine dans le sol et favorisant la colonisation par des bactéries bénéfiques, notamment fixatrices d'azote.

Les cellules de la coiffe sont continuellement renouvelées car elles s'usent rapidement (vie inférieure à une semaine). Par ailleurs, cette structure joue un rôle fondamental dans la perception de la gravité grâce à des plastides riches en amidon, les amyloplastes, qui se déplacent en réponse à l'orientation de la racine, permettant ainsi à la plante de guider sa croissance vers le bas (gravitropisme).

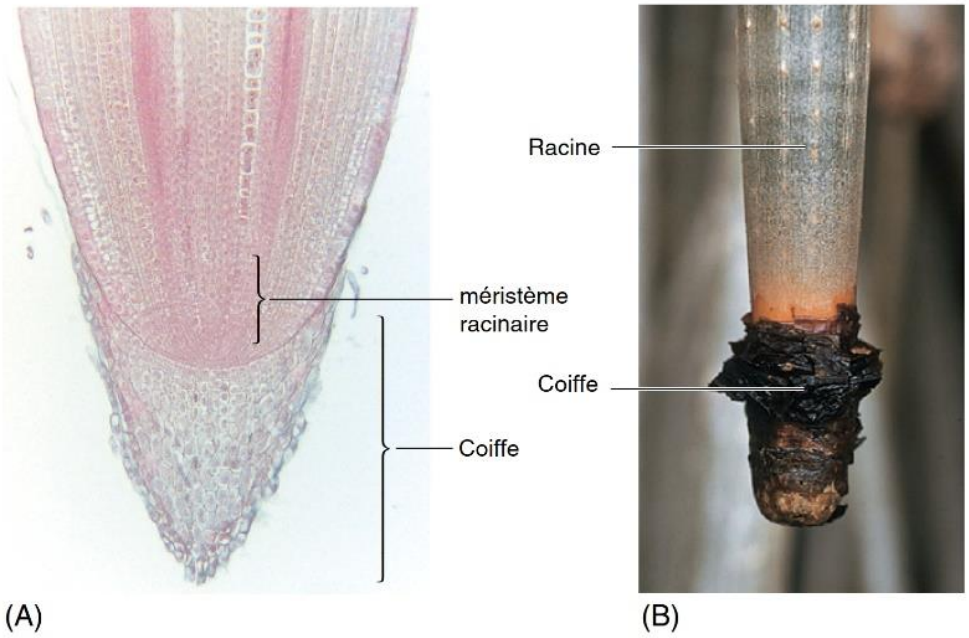


Figure 44: A ; Observation microscopique d'une coupe longitudinale d'une racine

B ; Le pandanus possède de grandes racines aériennes qui permettent de voir la coiffe racinaire plus facilement que sur des racines ordinaires.

b) Zone de division cellulaire : le méristème apical

Derrière la coiffe se trouve le méristème apical (Figure 45), un tissu constitué de cellules jeunes et actives en division. Ces divisions sont rythmées, avec des cycles variant de 12 à 36 heures, et plus lents à la base du méristème. Certaines cellules sont en pause dans une zone appelée centre quiescent, qui sert de réserve capable de reprendre l'activité en cas de blessure.

Le méristème se différencie rapidement en trois tissus primaires :

- **Le protoderme**, qui donnera naissance à l'épiderme, la couche externe protectrice.
- **Le méristème fondamental**, qui forme le cortex, un tissu parenchymateux interne servant notamment au stockage.
- **Le procambium**, un cylindre central qui donnera le xylème et le phloème primaires, les tissus conducteurs d'eau et de nutriments.

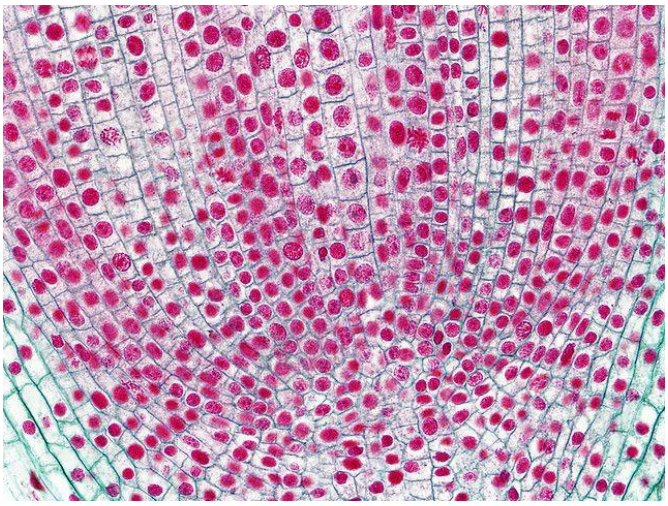


Figure 45 : Méristème apicale racinaire de l'oignon

c) Zone d'élongation

Juste au-dessus du méristème, les cellules commencent à s'allonger considérablement, plusieurs fois leur taille initiale. Leur vacuole centrale grossit jusqu'à occuper environ 90% du volume cellulaire. C'est dans cette zone que se réalise l'essentiel de la croissance en longueur de la racine, tandis que les cellules plus haut ne s'allongent plus.

En même temps, les cellules amorcent leur spécialisation : l'épiderme se forme à l'extérieur, le cortex s'organise au centre, et les premiers éléments conducteurs apparaissent.

d) Zone de maturation et poils absorbants

Dans cette région, les cellules deviennent pleinement spécialisées et forment les tissus primaires matures. Une caractéristique importante est le développement des **poils absorbants** (Figure 46), extensions tubulaires des cellules épidermiques, qui augmentent considérablement la surface d'absorption d'eau et de minéraux. Ces poils peuvent pénétrer dans de minuscules espaces du sol, souvent inaccessibles à la racine elle-même.

Les poils racinaires sont très nombreux (jusqu'à 38 000 par cm^2) mais ont une durée de vie courte, généralement de 4 à 21 jours.

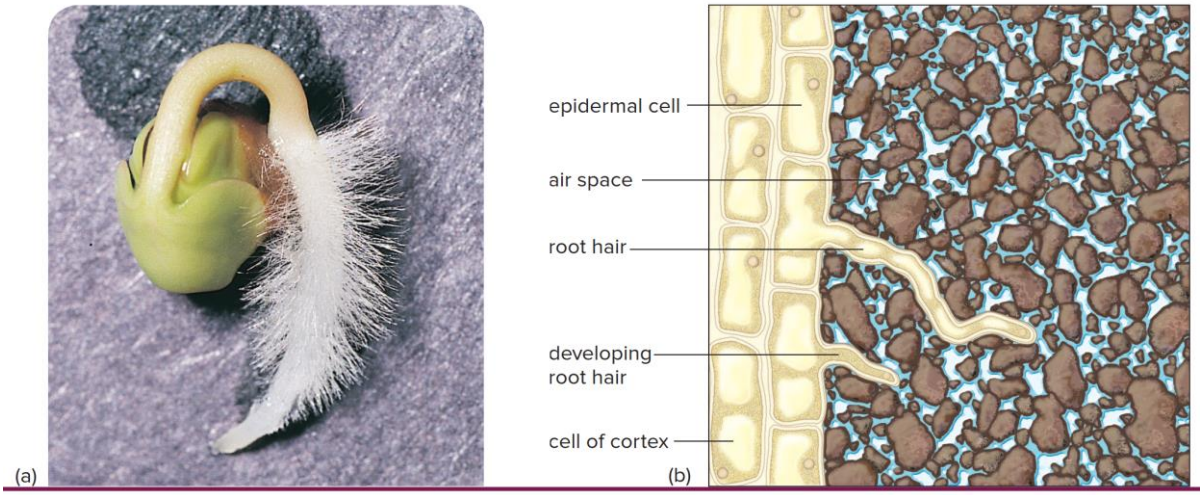


Figure 46: (a) Un plant de radis (Raphanus) peu après la germination, montrant les poils absorbants.
(b) Un schéma agrandi d'une coupe longitudinale d'une petite portion de la zone des poils, montrant les poils absorbants en contact avec les particules de sol.

Notez que dans la plupart des sols, l'espace aérien entre les particules est généralement bien moindre que ce qui est représenté sur cette image.

1.4.Le cortex

Le **cortex** (Figure 47), tissu parenchymateux situé entre l'épiderme et les tissus internes, joue un rôle important dans le stockage de réserves nutritives.

À l'intérieur du cortex se trouve une couche appelée **endoderme**, caractérisée par la présence des **bandes de Caspary** : des structures riches en subérine et lignine qui imperméabilisent les parois cellulaires radiales et transversales. Ces bandes forcent l'eau et les minéraux à traverser la membrane plasmique des cellules endodermiques, filtrant ainsi les substances absorbées, retenant les éléments utiles et excluant les toxiques.

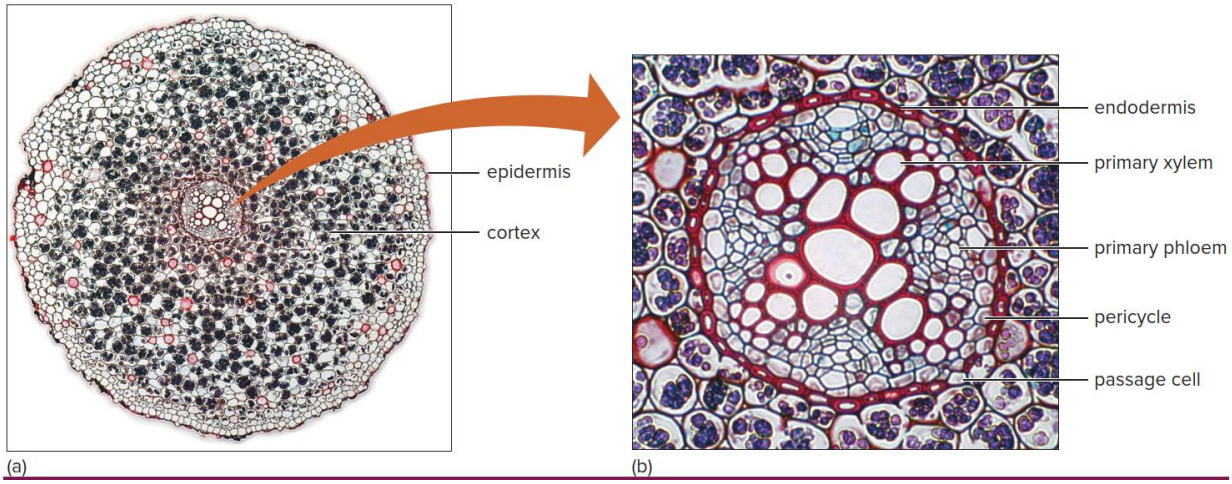


Figure 47: Le cortex

1.5. Le cylindre central

Au centre de la racine, entouré par l'endoderme, se trouve le **cylindre central ou cylindre vasculaire**, composé du xylème (transport de l'eau) et du phloème (transport des sucres et autres nutriments). Chez la plupart des dicotylédones, le xylème primaire forme un noyau central en forme d'étoile avec des bras qui s'étendent vers le péricycle. Le phloème primaire est situé entre ces bras.

Le **péricycle**, couche interne du cylindre, est constitué de cellules capables de se diviser même à maturité. Il est le siège de la formation des racines latérales et, chez les plantes ligneuses, il contribue à la formation du cambium vasculaire secondaire Figure (48).

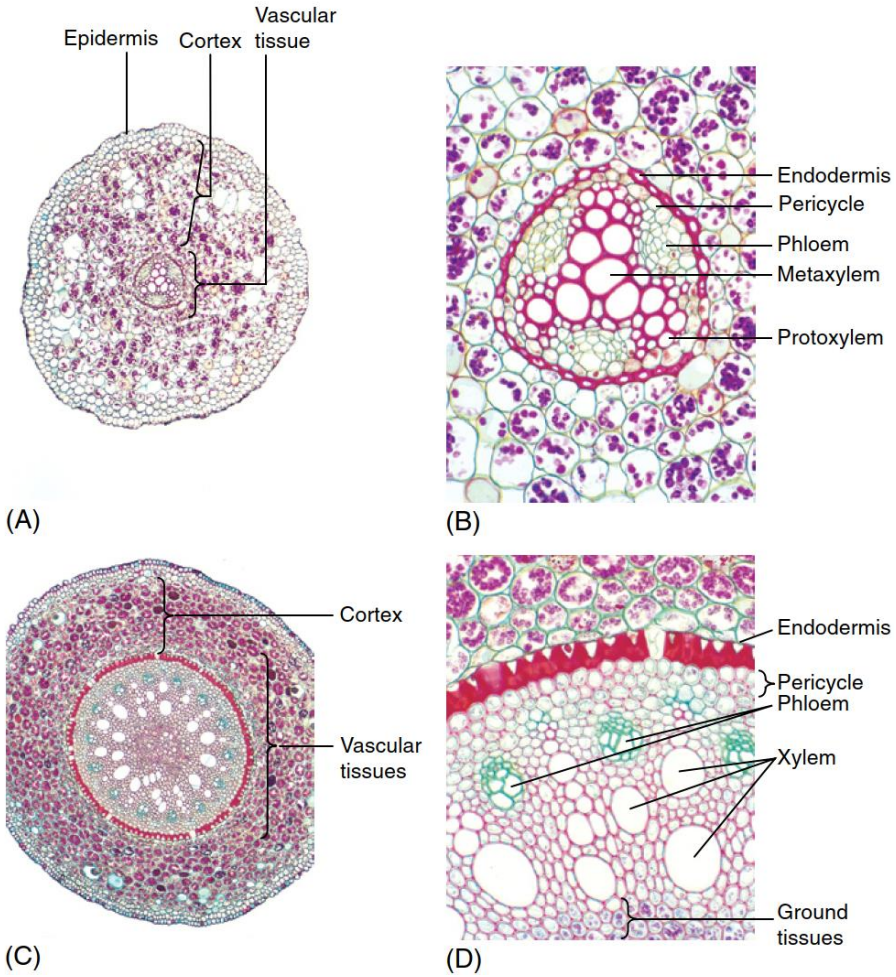


Figure 48: (A) Vue en faible grossissement d'une coupe transversale d'une racine dicotylédone (renoncule, *Ranunculus*) montrant un cortex large et un petit ensemble de tissus vasculaires.
(B) Vue en fort grossissement de cette même coupe, où l'on distingue trois séries de protoxylème. (C) Vue en faible grossissement et (D) en fort grossissement d'une coupe transversale d'une racine de monocotylédone (liseron sauvage, *Smilax*).

1.6. Croissance secondaire et protection

Chez les plantes ligneuses (dicotylédones et conifères), le cambium vasculaire, dérivé du péricycle, produit du xylème secondaire vers l'intérieur et du phloème secondaire vers l'extérieur, ce qui augmente la circonférence de la racine.

Parallèlement, le **cambium subérifère (ou phellogène)** génère le liège (ou suber), un tissu mort imprégné de subérine, qui protège la racine contre la dessiccation et les agressions extérieures.

Chez les monocotylédones, la croissance secondaire est généralement absente ou très limitée.

1.7.Formation des racines latérales (secondaires)

Les racines latérales (Figure 49) émergent du péricycle et poussent en traversant successivement l'endoderme, le cortex et l'épiderme. La croissance de ces racines provoque la rupture des tissus environnants. Les cellules parenchymateuses entre la racine principale et la racine latérale se différencient en tissus conducteurs, permettant la connexion vasculaire entre elles. Le nombre de racines latérales dépend fortement des conditions du sol : il est plus important dans un sol riche et humide et moindre dans un sol pauvre ou sec.

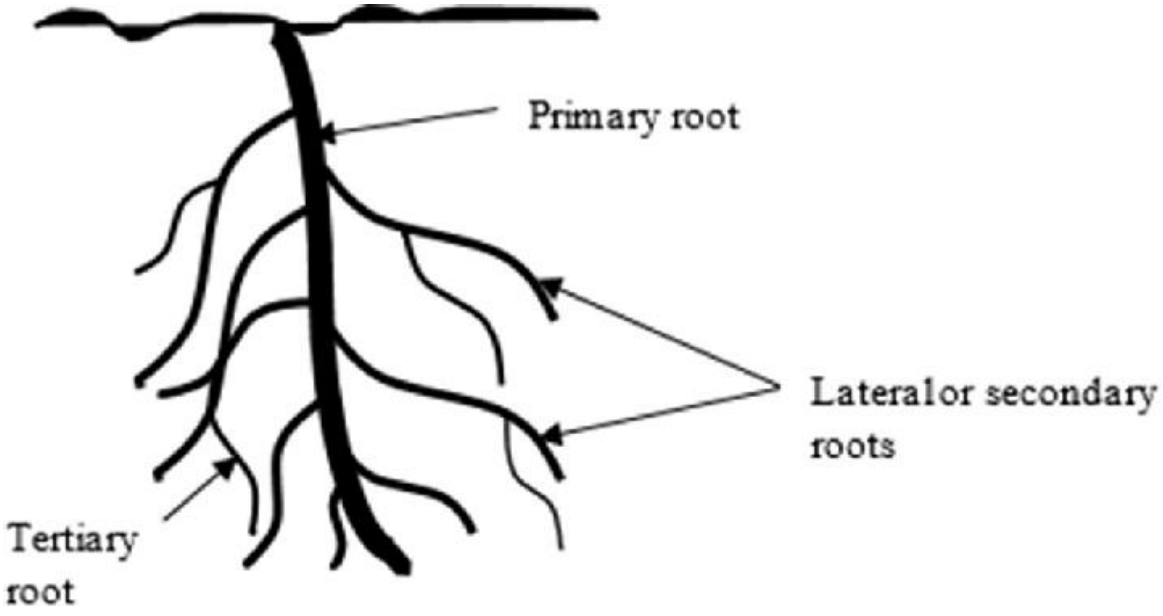


Figure 49 : Schéma montrant les différents types de racines

Tige

Un rapide examen des meubles et outils autour de la maison et du garage révèle rapidement que beaucoup de ce que nous utilisons quotidiennement et tenons pour acquis, des crayons et pianos aux journaux et balais, contient du bois. La majeure partie de ce bois provient des tiges des plantes. En fait, les tiges ont fait partie intégrante de la vie humaine depuis que l'humanité utilise des massues en bois pour chasser sa nourriture. Le greffage, qui consiste généralement à unir artificiellement des tiges ou des parties de tiges de différentes variétés de plantes proches, est pratiqué par l'homme depuis des centaines d'années. Pour comprendre comment et pourquoi les greffes peuvent réussir ou échouer, et pour identifier quelles parties des tiges sont utiles, il est d'abord nécessaire d'examiner la structure des tiges et d'apprendre les fonctions fondamentales des différents tissus.

Contrairement aux animaux, certaines plantes ont une croissance indéfinie grâce à des zones appelées méristèmes, situées aux extrémités des tiges, qui permettent à la plante de grandir en longueur et en épaisseur pendant des années.

1. Forme externe d'un rameau ligneux

Un rameau ligneux est constitué d'un axe principal portant des feuilles, qui peuvent être disposées selon trois types d'organisation : de manière alternée (une feuille par nœud, en spirale autour de la tige), opposée (deux feuilles par nœud, face à face), ou en verticilles (groupes de trois feuilles ou plus par nœud). La zone de la tige où une ou plusieurs feuilles sont fixées s'appelle un nœud, tandis que la portion de tige située entre deux nœuds est appelée entre-nœud.

Chaque feuille est généralement composée d'une lame aplatie, reliée à la tige par un pétiole. À l'angle formé entre le pétiole et la tige, appelé l'aisselle, se trouve un bourgeon axillaire. Ce bourgeon peut se développer soit en une nouvelle branche, soit en un bourgeon floral, qui donnera naissance aux fleurs lors de la saison suivante.

Au sommet du rameau se situe souvent un bourgeon terminal, plus volumineux que les bourgeons axillaires. Contrairement à ces derniers, ce bourgeon ne forme pas une branche distincte, mais permet la croissance en longueur du rameau grâce à l'activité des méristèmes qu'il contient. Les écailles protectrices qui recouvrent les bourgeons tombent au printemps, laissant sur la tige de petites cicatrices caractéristiques. Le comptage des groupes de ces cicatrices d'écailles permet de déterminer l'âge approximatif du rameau (Figure 50).

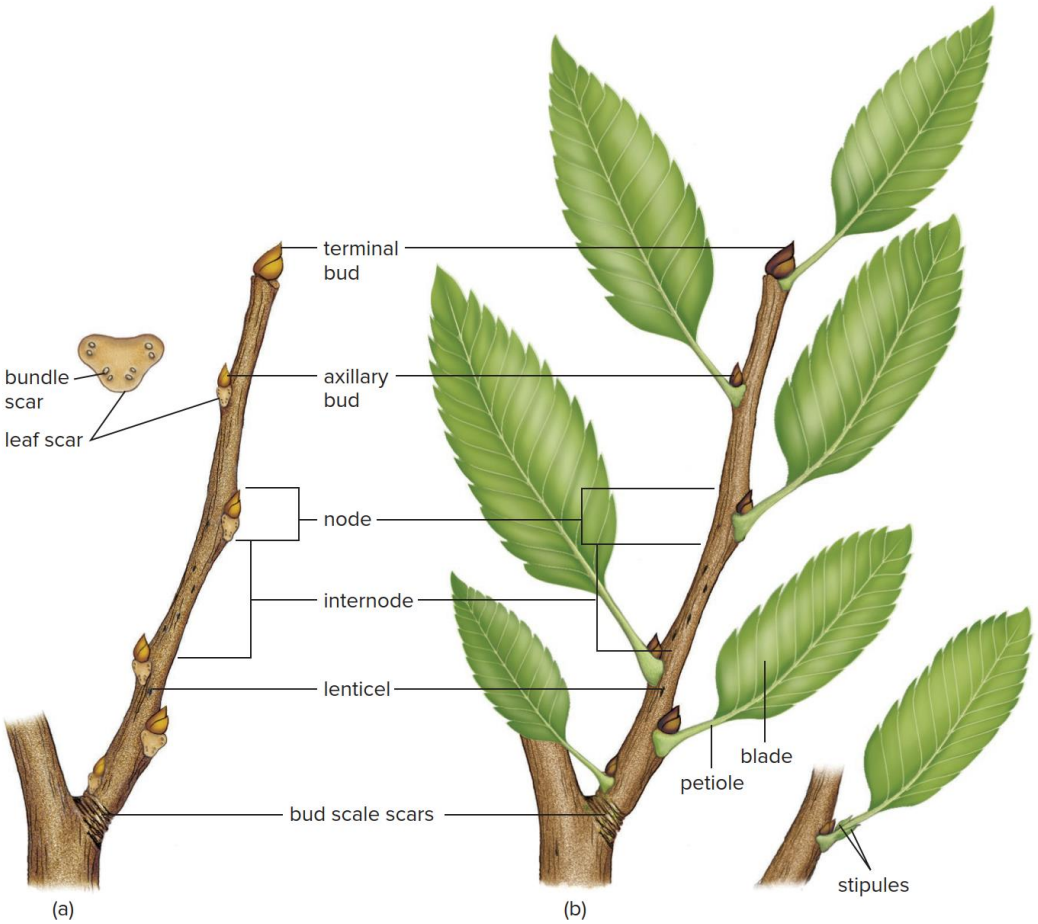


Figure 50 : Un rameau ligneux. (a) Le rameau en hiver, dans son état dormant. (b) Le même rameau tel qu'il était l'été précédent

Par ailleurs, lors de la chute des feuilles, des cicatrices foliaires restent visibles sur le rameau, marquant les points d'attache des feuilles. Ces cicatrices révèlent la présence des faisceaux conducteurs de sève, appelés cicatrices de faisceaux, qui apparaissent souvent par groupes de trois et sont spécifiques à chaque espèce. Chez les plantes à feuilles caduques, ces cicatrices foliaires sont toujours présentes sous les bourgeons axillaires dormants.

Enfin, ces cicatrices foliaires et la disposition des bourgeons fournissent des indices précieux permettant d'identifier les plantes même en période hivernale, lorsque les feuilles sont absentes.

2. Origine et développement des tiges

Au sommet de chaque tige se trouve un méristème apical, une zone de division cellulaire active responsable de l'allongement de la tige. Ce méristème est protégé par les écailles du bourgeon ainsi que par de petites feuilles embryonnaires appelées primordia, qui deviendront des feuilles matures.

Pendant la croissance, le méristème apical produit trois types de tissus primaires essentiels à la formation de la tige :

- **Le protoderme**, qui donnera naissance à l'épiderme, une fine couche externe protectrice souvent recouverte d'une cuticule cireuse limitant la perte d'eau.
- **Le procambium**, qui forme les tissus conducteurs : le xylème primaire transporte l'eau et les sels minéraux, tandis que le phloème primaire distribue les substances nutritives fabriquées par la plante.
- **Le méristème fondamental**, qui produit le parenchyme, divisé en deux parties : la moelle au centre, constituée de grandes cellules souvent creuses, et le cortex qui entoure la moelle et peut stocker des réserves ou fabriquer de la nourriture s'il contient des chloroplastes.

Ces tissus primaires sont formés au fur et à mesure que la tige s'allonge grâce au méristème apical (Figure 51).

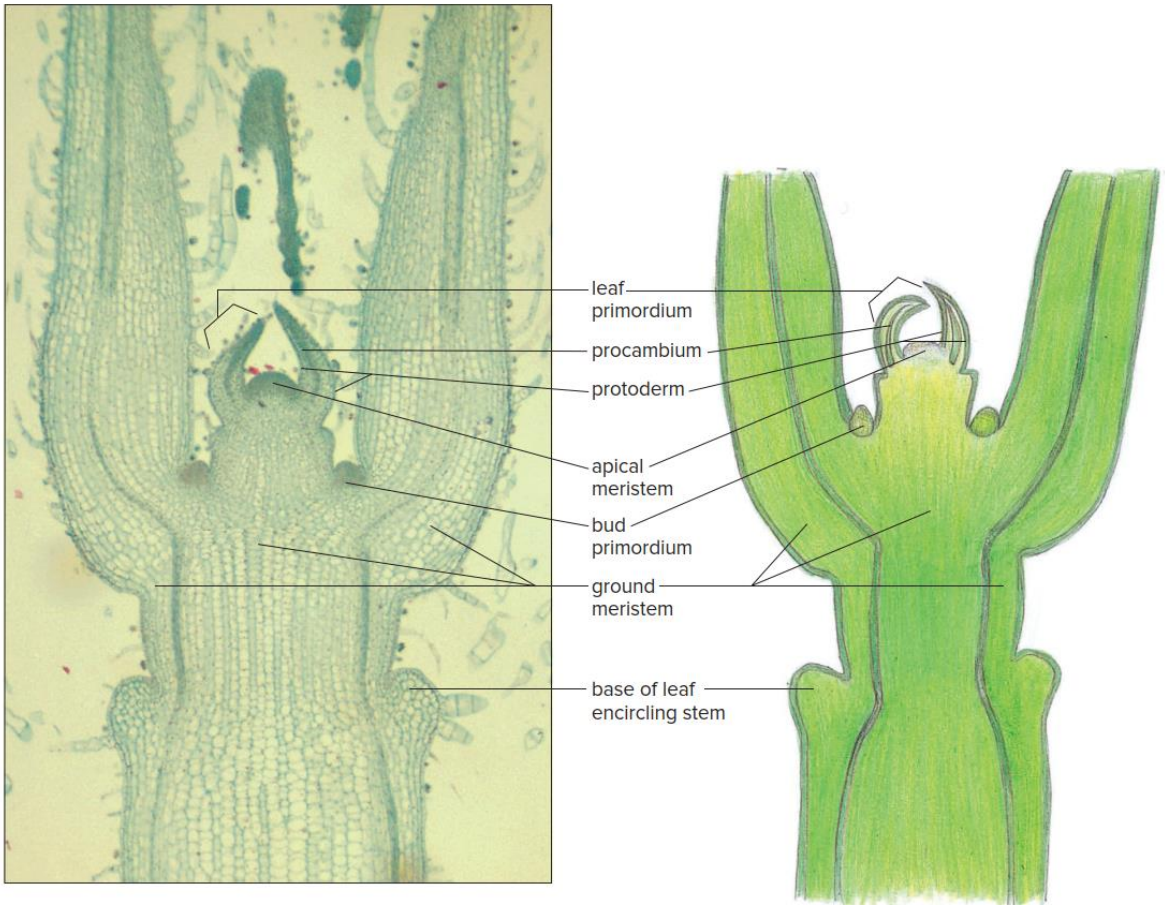


Figure 51: Une coupe longitudinale à travers l'extrémité d'une tige de Coleus

Entre le xylème et le phloème primaires peut se développer une zone de cellules méristématiques appelée **cambium vasculaire**. Ce cambium est un méristème latéral qui produit les tissus secondaires responsables de l'épaississement de la tige :

- Le **xylème secondaire**, plus communément appelé bois, vers l'intérieur,
- Le **phloème secondaire** vers l'extérieur.

En plus du cambium vasculaire, un autre cambium nommé **cambium subéro-phellodermique** (ou phellogène) se forme dans le cortex. Il produit le **liège**, tissu imperméable grâce à la subérine, qui constitue l'écorce externe des plantes ligneuses. Ce liège protège la tige contre la dessiccation et les blessures.

Parce que le liège empêche les échanges gazeux, la plante développe des **lenticelles** : ce sont des zones où les cellules restent vivantes et perméables, permettant la respiration de la tige.

Enfin, la croissance en longueur de la tige est assurée uniquement par le méristème apical situé à son extrémité, tandis que l'augmentation du diamètre (croissance en épaisseur) est rendue possible grâce à l'activité du cambium.

3. Schémas tissulaires dans les tiges

a) Stèles

Chez la plupart des tiges jeunes et quelques tiges ou racines plus âgées, un cylindre central appelé stèle est constitué de xylème primaire, de phloème primaire et, lorsqu'il est présent, de la moelle. La forme la plus simple de stèle, appelée protostèle, correspond à un noyau solide de tissus conducteurs où le phloème entoure généralement le xylème. Les protostèles étaient fréquentes chez les premières plantes à graines aujourd'hui disparues, mais on les retrouve aussi chez les prêles, les lycopodes et d'autres plantes apparentées aux fougères.

Les plantes à fleurs se développent à partir de graines possédant soit une, soit deux feuilles embryonnaires appelées cotylédons, attachées à leur tige embryonnaire. Les graines de pins et d'autres arbres à cônes contiennent plusieurs cotylédons (généralement huit). Ces cotylédons servent généralement de réserves alimentaires pour la jeune plantule, jusqu'à ce que ses premières vraies feuilles puissent produire leur propre nourriture.

Les plantes à fleurs issues de graines avec deux cotylédons sont appelées dicotylédones (ou dicots), tandis que celles provenant de graines avec un seul cotylédon sont nommées monocotylédones (ou monocots). Outre ce nombre de cotylédons, dicots et monocots diffèrent sur plusieurs autres points, notamment dans la structure de la tige, comme détaillé dans les sections suivantes.

b) Tiges herbacées dicotylédones

Les plantes annuelles, qui vivent une seule saison, ont généralement des tiges vertes et herbacées (non ligneuses). La plupart des monocotylédones sont annuelles, mais beaucoup de dicotylédones le sont aussi. Les tiges herbacées dicotylédones possèdent des faisceaux vasculaires bien séparés, composés de xylème et de phloème, disposés en cylindre autour de la moelle. Le procambium produit d'abord du xylème et du phloème primaires, puis un cambium vasculaire apparaît entre eux, permettant la formation de tissus secondaires (xylème et phloème secondaires). Ce cambium peut former un anneau continu ou rester limité à chaque faisceau selon les plantes (Figure 52).

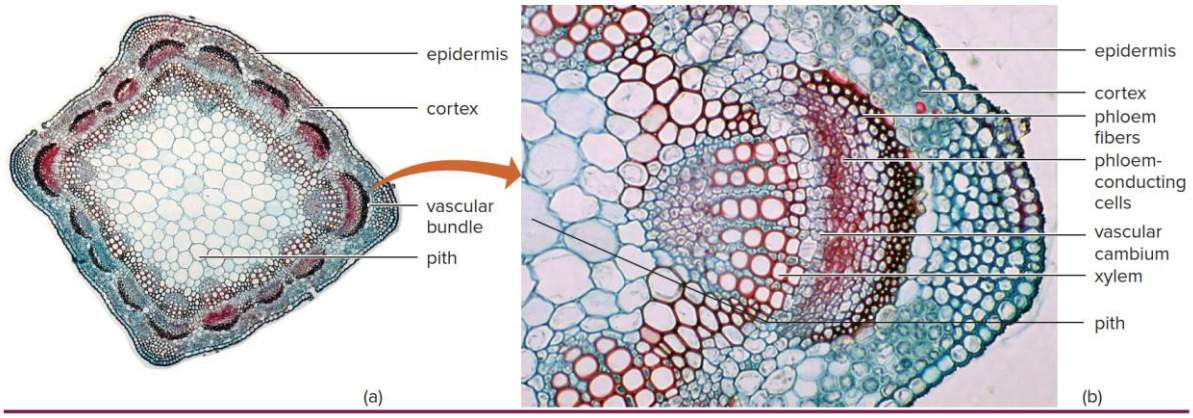


Figure 52: (a) : Une coupe transversale d'une tige herbacée dicotylédone (luzerne).

(b) Un agrandissement d'une petite portion de la partie externe de la tige

c) Tiges ligneuses dicotylédones

Au début, la structure des jeunes tiges herbacées, ligneuses ou des conifères est similaire, mais dans les plantes ligneuses, des différences apparaissent avec le développement des cambiums vasculaire et subérine (du liège). Le bois (xylème secondaire) est l'élément le plus visible de cette transformation (Figure 53) .

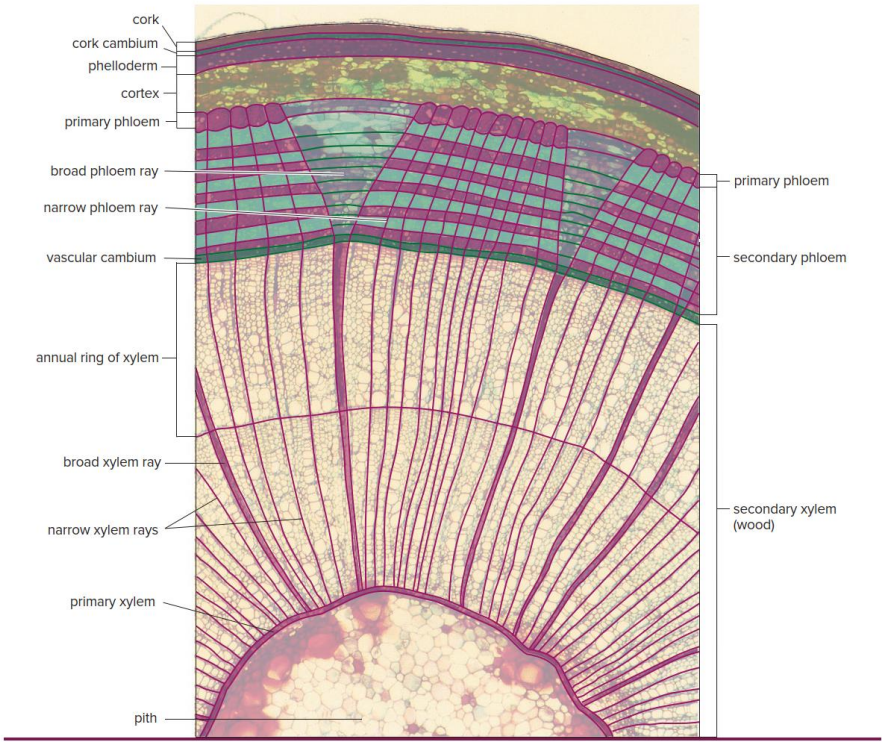


Figure 53: Une coupe transversale d'une partie d'une jeune tige de tilleul (Tilia)

Dans les arbres tempérés, la croissance du bois est saisonnière : au printemps, le cambium produit un bois clair à gros vaisseaux (bois de printemps), puis un bois plus dense à vaisseaux plus petits (bois d'été). Cette alternance crée des anneaux annuels visibles dans la coupe transversale du tronc, permettant de déterminer l'âge de l'arbre et d'étudier les conditions climatiques passées.

Les rayons vasculaires, formés de cellules parenchymateuses, rayonnent depuis le centre du tronc et assurent la conduction latérale de l'eau et des nutriments. Avec le temps, certains vaisseaux sont obstrués par des thylles, remplissant leur cavité et formant le duramen (bois de cœur), plus foncé et non fonctionnel, tandis que le bois plus clair et fonctionnel proche du cambium est l'aubier.

La croissance du bois chez les arbres se fait en alternant deux types de tissus xylémiques produits selon les saisons. Au début du printemps, le cambium produit un bois clair et constitué de grosses cellules, appelé bois de printemps. Puis, en été, le bois produit est plus foncé, avec des cellules plus petites et plus denses, appelé bois d'été. Cette alternance crée des anneaux concentriques visibles en coupe transversale du tronc, appelés anneaux annuels. Chaque anneau correspond à la croissance du xylème sur une année et permet de déterminer l'âge de l'arbre.

Chez les conifères, le bois est surtout composé de trachéides, sans vaisseaux ni fibres, tandis que les dicotylédones ont un bois plus complexe appelé bois dur. Le bois central, ou duramen, est souvent plus sombre et inactif, tandis que l'aubier, plus clair, conduit encore la sève (Figure 54).

L'écorce comprend le phloème, qui transporte les sucres, et le liège, produit par le cambium subérin, qui protège la plante. Le phloème finit par s'écraser et devenir inutilisable, remplacé progressivement par le liège.

Certaines plantes produisent du latex, un liquide épais utilisé notamment pour le caoutchouc et certains médicaments.

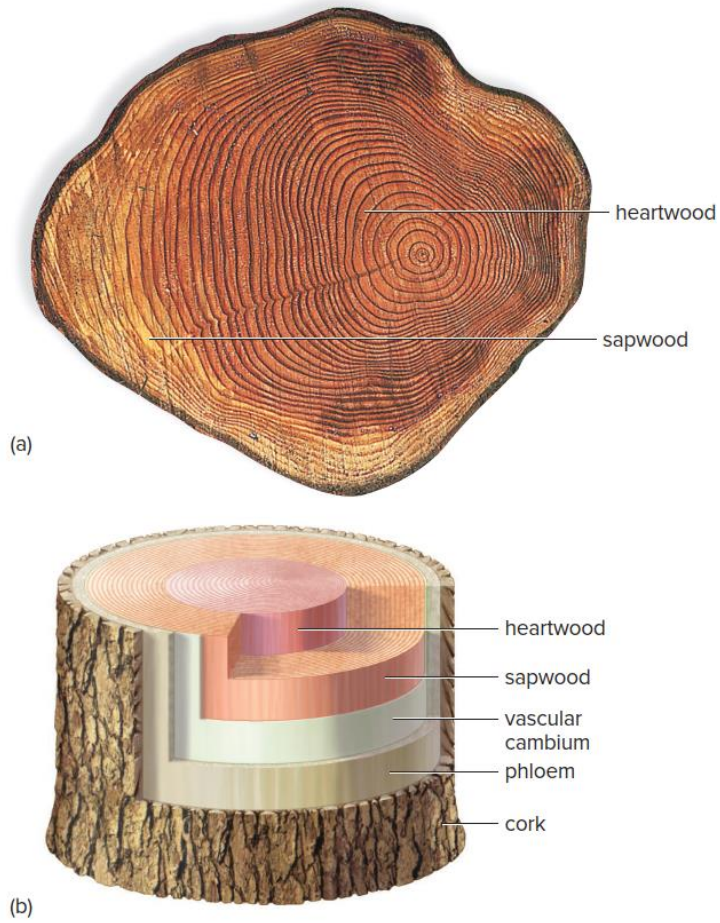


Figure 54: (a) Une coupe transversale d'un mélèze de 39 ans (Larix decidua) montrant le duramen plus foncé à l'intérieur et l'aubier plus clair à l'extérieur.

(b) Une coupe longitudinale montrant le duramen et l'aubier en relation avec les autres tissus du tronc d'un arbre.

Chez beaucoup de conifères, on trouve des canaux spécialisés qui sécrètent de la résine, une substance collante et protectrice. Ces canaux peuvent être tubulaires et parfois ramifiés, et ils se répartissent dans le bois et d'autres tissus (Figure 55). La résine s'accumule aussi quand certaines cellules bouchent les conduits du bois, ce qui assombrit la partie centrale du tronc. En plus de protéger contre les agressions extérieures, la résine aide à cicatriser les blessures de la plante. Certaines plantes tropicales à fleurs, comme l'oliban et la myrrhe, possèdent aussi ces canaux et produisent des résines utilisées pour l'encens ou d'autres usages.

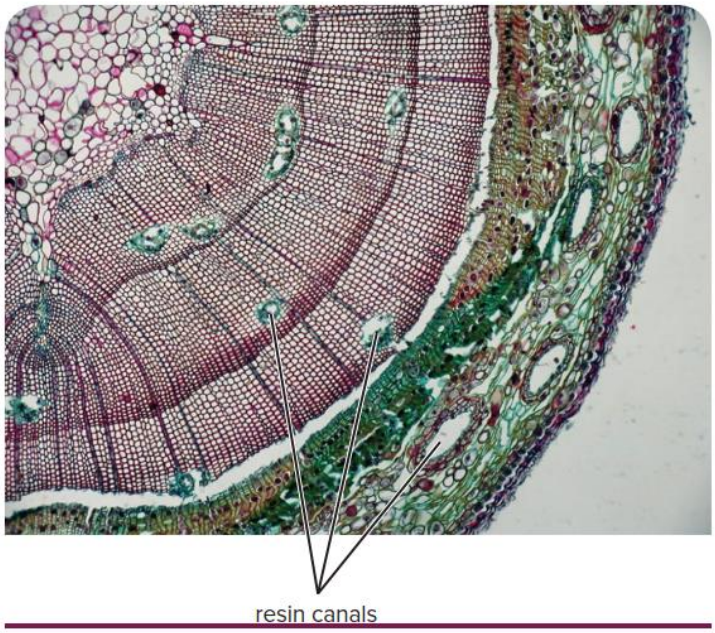


Figure 55: Canaux de résine dans une portion de tige de pin (Pinus)

d) Tiges monocotylédones

La plupart des monocotylédones, comme les herbes, les lys ou le maïs, ont des tiges herbacées sans cambium vasculaire ni cambium subérine, ce qui signifie qu'elles ne possèdent pas de croissance secondaire. Leur surface est recouverte d'un épiderme, et les tissus de xylème et de phloème produits par le procambium apparaissent en coupe transversale sous forme de faisceaux vasculaires discrets (Figure 56 a), dispersés dans toute la tige plutôt qu'organisés en anneau. Chaque faisceau est orienté de façon à ce que le xylème soit dirigé vers le centre de la tige et le phloème vers la surface.

Chez une monocotylédone typique, comme le maïs, le xylème d'un faisceau contient généralement deux gros vaisseaux entourés de plusieurs petits vaisseaux (Figure 56 b). Le parenchyme situé entre les faisceaux n'est pas différencié en cortex et moelle, mais remplit des fonctions similaires. Sous l'épiderme, une couche de sclérenchyme renforce la tige pour lui permettre de résister aux contraintes mécaniques.

Chez certaines monocotylédones comme les palmiers, la croissance s'effectue principalement par division et allongement des cellules parenchymateuses, sans formation de cambium.

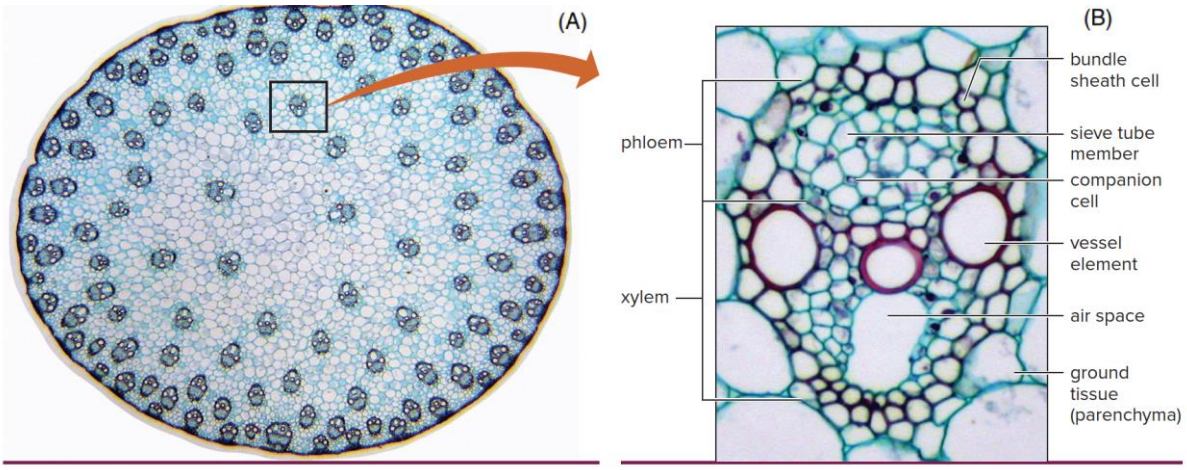


Figure 56: a) Une coupe transversale d'une monocotylédone (Maïs Zea *mays*)

b) Un faisceau vasculaire unique de Maïs

e) Tiges spécialisées

Bien que la plupart des plantes supérieures possèdent un système de tiges dressées, beaucoup d'espèces ont des tiges modifiées pour remplir des fonctions spécifiques (Figure 57). Ces tiges spécialisées peuvent avoir une apparence très différente des tiges classiques, mais elles possèdent toujours des nœuds, des entre-nœuds et des bourgeons axillaires, ce qui les distingue des racines et des feuilles. Les feuilles présentes aux nœuds sont souvent petites et écailleuses, rarement vertes, mais certaines tiges produisent aussi des feuilles fonctionnelles normales. Voici quelques exemples de tiges spécialisées :

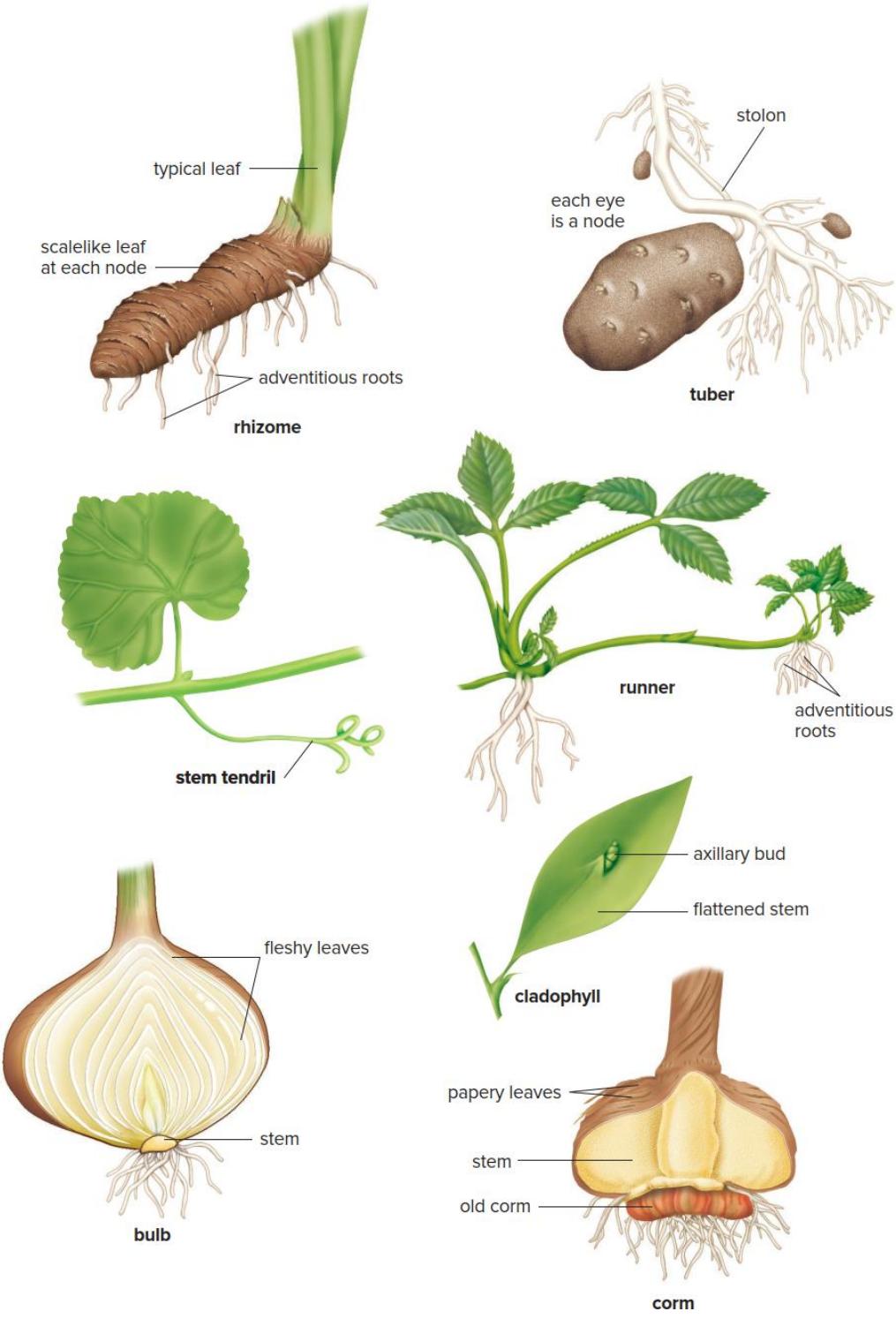


Figure 57: Les différents types de tiges spécialisées

Rhizomes

Ce sont des tiges horizontales qui poussent sous terre, souvent juste sous la surface. Elles ressemblent superficiellement à des racines, mais portent des feuilles écailleuses et des bourgeons axillaires à chaque nœud. Elles produisent des racines adventives sur leur face inférieure. Les rhizomes peuvent être épais

et charnus (comme chez les iris) ou fins et allongés (comme chez certaines graminées ou fougères).

Stolons et Runners

Les runners sont des tiges horizontales qui poussent au-dessus du sol, avec de longs entre-nœuds. Par exemple, les fraisiers produisent des runners après la floraison, qui développent des bourgeons adventifs formant de nouvelles plantes. Les stolons sont similaires, mais poussent généralement sous la surface du sol et peuvent avoir des directions variées. Chez la pomme de terre, les tubercules se développent à l'extrémité des stolons. Certains botanistes considèrent runners et stolons comme des variantes d'une même structure.

Tubercules

Chez la pomme de terre, certains entre-nœuds à l'extrémité des stolons s'épaississent en tubercules, qui stockent des réserves alimentaires. Les « yeux » du tubercule correspondent à des nœuds avec des bourgeons axillaires.

Bulbes

Les bulbes sont de gros bourgeons entourés de nombreuses feuilles charnues qui stockent des réserves alimentaires, avec une petite tige à la base. Par exemple, les oignons, les lys et les tulipes produisent des bulbes.

Cormes

Similaires aux bulbes, les cormes sont principalement constituées de tissu de tige et recouverts de quelques feuilles écailleuses fines. Ils stockent aussi des réserves alimentaires. Le crocus et le glaïeul en sont des exemples.

Cladodes (Cladophylles)

Ce sont des tiges aplaties qui ressemblent à des feuilles, comme chez le rusé (*Ruscus hypoglossum*). Elles portent de petites feuilles écailleuses avec des bourgeons axillaires. Certains autres végétaux, comme certains cactus, possèdent aussi des cladodes.

Autres tiges spécialisées

Les tiges charnues et épaisses de nombreux cactus et euphorbes servent à stocker l'eau et les réserves. Certaines tiges sont modifiées en épines (Figure 58), comme chez le robinier faux-acacia, bien que toutes les structures épineuses ne soient pas des tiges modifiées (par exemple, les aiguillons des rosiers viennent de l'épiderme). Les plantes grimpantes ont souvent des tiges modifiées pour faciliter leur accroche : certaines forment des rameaux

rampants, d'autres des vrilles, qui peuvent être des tiges modifiées (vigne, lierre de Boston) ou des feuilles modifiées (pois, concombre).



Figure 58: Les tiges aplaties des cactus raquettes (Opuntia) sont des cladophylles sur lesquelles les feuilles se sont transformées en épines.

Feuilles

Les **feuilles**, véritables panneaux solaires de la nature, sont des organes végétaux essentiels à la vie des plantes. Elles captent l'énergie solaire pour réaliser la **photosynthèse**, processus fondamental permettant la production de sucres nécessaires à la nutrition de tous les organismes vivants. Ce processus se déroule principalement grâce à des cellules spécialisées appelées **stomates**, qui permettent l'entrée du dioxyde de carbone et l'évacuation de l'oxygène et de la vapeur d'eau.

Les feuilles jouent également un rôle central dans la **transpiration**, permettant l'évaporation de l'eau absorbée par les racines à travers les stomates. Certaines plantes possèdent des **hydathodes** pour éliminer l'excès d'eau sous forme liquide, phénomène appelé **guttation**, qui se produit souvent la nuit. Outre la photosynthèse, les feuilles participent à la **respiration cellulaire** et à l'élimination des déchets métaboliques via l'abscission en automne.

1. Structure des Feuilles

Les **feuilles** se composent généralement de trois parties principales : **le limbe**, **le pétiole** (qui les relie à la tige), et parfois une **gaine**. Leur structure peut varier en fonction de l'espèce (Figure 59) :

- **Feuilles simples** : Elles possèdent un seul limbe continu à l'extrémité d'un pétiole non ramifié. Le limbe peut être entier, denté, lobé, ou séqué, et sa forme varie selon l'espèce (rond, lancéolé, etc.).
- **Feuilles composées** : Constituées de plusieurs folioles, elles peuvent se présenter sous diverses formes :
    - **Feuille composée pennée** : Les folioles sont disposées de part et d'autre d'un rachis, comme dans les légumineuses (Fabaceae, par exemple *Pisum sativum*, le pois).
    - **Feuille composée palmée** : Toutes les folioles partent d'un même point au sommet du pétiole, comme dans les érables (Acer spp., par exemple *Acer saccharinum*, l'érable argenté).
    - **Feuille composée bipennée et tripennée** : Composée de folioles disposées de manière répétée le long de rachis secondaires et tertiaires.

- **Feuille trifoliée** : Composée de trois folioles distinctes, comme le trèfle (Trifolium spp., par exemple *Trifolium repens*, le trèfle blanc).

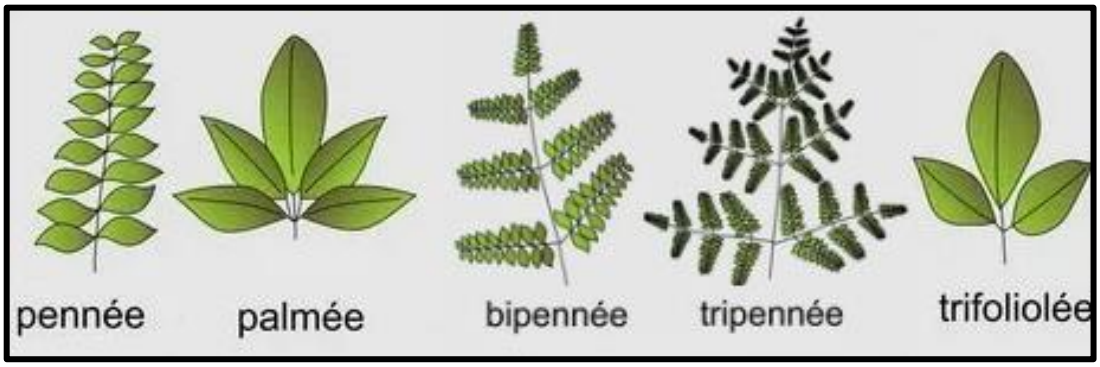


Figure 59: Illustration des Types de Feuilles Composées : Pennée, Palmée, Bipennée, Tripennée et Trifoliolée

Les **feuilles sessiles** n'ont pas de pétiole, et certaines peuvent présenter des **stipules**, appendices souvent visibles à la base du pétiole.

Disposition des Feuilles (Phyllotaxie)

La disposition des feuilles sur la tige varie en fonction des espèces et peut être de trois types principaux :

- **Alternée** : Une feuille par nœud, disposée en spirale.
- **Opposée** : Deux feuilles par nœud, opposées l'une à l'autre.
- **En verticille** : Trois feuilles ou plus à chaque nœud.

2. Disposition des Nervures (Nervation)

La **nervation** fait référence à l'agencement des nervures principales, qui sont responsables du transport de la sève à travers le limbe des feuilles. Voici les différents types de nervation (Figure 60) :

- **Feuilles uninerve** : Ces feuilles possèdent une seule nervure principale qui traverse un limbe étroit. Ce type de nervation est typique des feuilles en forme d'aiguilles, comme celles du **romarin** (*Rosmarinus officinalis*).
- **Feuilles parallélinerves (nervation parallèle)** : Les nervures de ces feuilles partent de la base du limbe en suivant des lignes parallèles, sans se rejoindre. Ce type de nervation est caractéristique des **Monocotylédones**.

- **Feuilles pennatinerves** (**nervation penné**) : La nervure principale divise le limbe en deux parties égales, et des nervures secondaires s'en écartent de manière latérale tout au long de la feuille. C'est le cas des feuilles des **Dicotylédones**, comme celles des rosiers.
- **Feuilles palmatinerves (nervation penné)** : Dans ce type de nervation, toutes les nervures partent d'un même point au sommet du pétiole. La nervure centrale reste la plus marquée, tandis que les nervures secondaires se répartissent à partir de la base de la nervure principale. Ce type est courant chez des plantes comme l'érable (*Acer* spp.).
- **Nervation pédalée** : Ces feuilles présentent trois nervures principales qui rayonnent depuis la base, tandis que d'autres nervures sont des ramifications des nervures latérales. Ce modèle est rencontré, par exemple, chez certaines plantes comme **les** trèfles (*Trifolium* spp.).
- **Nervation réticulée** : Les nervures de ces feuilles forment un réseau quadrillé complexe à l'intérieur du limbe, ce qui est typique des feuilles de nombreuses **Dicotylédones**, comme celles du **chêne** (*Quercus robur*).

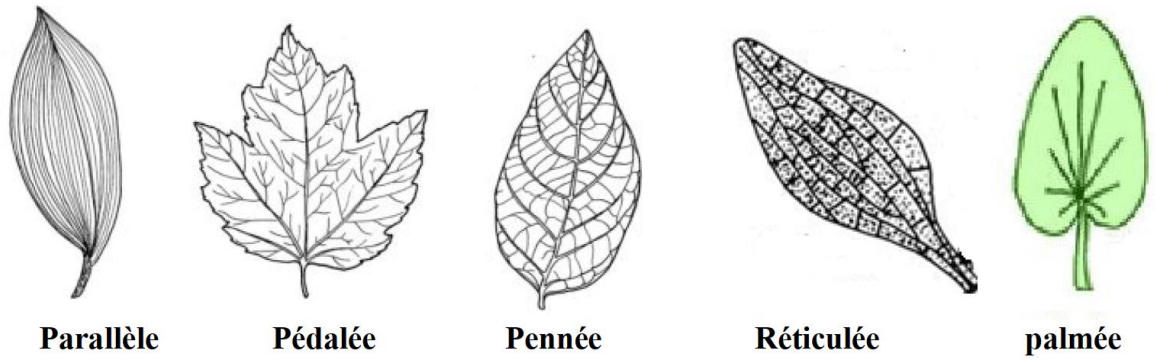


Figure 60: Les forme des feuilles selon les nervures

3. Diversité des Formes et Textures des Feuilles

Les feuilles peuvent prendre des formes (Figure 61) variées allant de **plates** à **tubulaires**, **en forme de plume**, ou **en aiguilles**. Elles peuvent également présenter des textures différentes : **lisses**, **duveteuses**, **cireuses**, ou **brillantes**, et peuvent varier en couleur. Certaines sont **parfumées**, **comestibles**, ou **toxiques**.



Figure 61: Types de feuilles et disposition de feuilles.

(a) Feuille composée palmée d'un marronnier (Aesculus). (b) Feuilles simples opposées d'un cornouiller (Cornus). (c) Feuille composée pennée d'un noyer noir (*Juglans nigra*). (d) Feuilles simples alternées mais lobées d'un tulipier

(*Liriodendron tulipifera*). (e) Feuille à nervation parallèle d'une herbe (Poaceae). (f) Feuille à nervation palmée d'un érable (Acer). (g) Feuilles en verticille d'un gaillet (Galium). (h) Feuille lobée à nervation pennée d'un chêne (Quercus). (i) Feuilles linéaires d'un if (Taxus). (j) Feuilles succulentes en forme de globe d'une chaîne de perles (*Senecio rowleyanus*). (k) Feuille en forme d'éventail d'un arbre de Ginkgo (*Ginkgo biloba*), montrant une nervation dichotomique.

Les feuilles peuvent aller de moins de 1 millimètre de large, comme celles des petites lentilles d'eau (*Lemna minor*), à 6 mètres de long, comme les feuilles matures du palmier des îles Seychelles (*Raphia regalis*). Certaines feuilles flottantes de nénuphars géants (*Victoria amazonica*) peuvent atteindre 2 mètres de diamètre et supporter des poids de plus de 45 kilogrammes sans sombrer (Figure 62)



Figure 62: Les feuilles flottantes du nénuphar géant (*Victoria amazonica*), qui atteignent parfois un diamètre de 2 mètres (6,5 pieds). Les feuilles les plus grandes sont capables de supporter le poids d'un enfant, sans sombrer.

4. Structure interne des feuilles

4.1. Epiderme

L'épiderme des feuilles des plantes est constitué de cellules plates et tabulaires, que l'on trouve aussi bien sur la face supérieure que sur la face inférieure des feuilles. Toutefois, l'épiderme inférieur se distingue de l'épiderme supérieur par une couche de cuticule plus fine et la présence de stomates, qui sont de petits pores permettant des échanges gazeux essentiels pour la photosynthèse. Ces stomates sont particulièrement nombreux sur l'épiderme inférieur, où ils peuvent atteindre des densités variant de 1 000 à plus de 1,2 million par centimètre carré, ce qui permet une régulation optimale des échanges de gaz et de la transpiration (Figure 63).

Lorsque les cellules de garde se gonflent, les stomates s'ouvrent, permettant l'entrée du dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse et l'échange de gaz avec l'atmosphère. Lorsque l'eau s'évapore des cellules de garde, celles-ci se dégonflent, fermant ainsi les stomates pour éviter une perte excessive d'eau, particulièrement en cas de sécheresse.

La répartition des stomates entre l'épiderme supérieur et inférieur varie selon les espèces. Par exemple, certaines plantes comme les nénuphars n'ont des stomates que sur l'épiderme supérieur, tandis que d'autres, comme le trèfle et le maïs, les ont sur les deux surfaces. La répartition est souvent unilatérale, les stomates étant beaucoup plus nombreux sur l'épiderme inférieur, ce qui permet de limiter la perte d'eau par évaporation, car l'air est piégé sous la feuille et les stomates inférieurs bénéficient d'une meilleure diffusion des molécules d'eau.

Cette configuration a aussi des avantages écologiques. Par exemple, l'absence de stomates sur l'épiderme supérieur empêche une pénétration excessive des spores de champignons et de bactéries. De plus, les stomates sont souvent enfoncés dans des cavités épidermiques, créant un espace d'air calme qui réduit la perte d'eau, comme observé chez le laurier-rose. Ce phénomène aide à retenir l'humidité et à protéger la plante de l'évaporation.

En plus des stomates, de nombreuses feuilles présentent des trichomes, qui sont des poils épidermiques. Les trichomes jouent un rôle crucial en offrant une protection contre les conditions environnementales extrêmes. Ils agissent comme des ombrages, réduisant l'exposition à la lumière excessive, ce qui est particulièrement utile pour les plantes des déserts. Sur l'épiderme inférieur, les trichomes ralentissent les mouvements de l'air et limitent la perte d'eau par

évaporation. Ils rendent également la surface des feuilles moins agréable pour les herbivores et certaines espèces de trichomes glandulaires sécrètent des substances répulsives pour dissuader les animaux de consommer la feuille.

Les trichomes contribuent également à la protection de la feuille contre les champignons et autres agents pathogènes. Leur surface lisse empêche l'adhésion des spores et des champignons, tandis que, dans des environnements où le brouillard ou la rosée est fréquent, les gouttes d'eau se condensent sur les trichomes au lieu de se fixer sur l'épiderme, ce qui aide à maintenir les stomates fonctionnels en évitant la formation d'un film d'eau qui pourrait bloquer les pores et nuire aux échanges gazeux nécessaires à la photosynthèse.

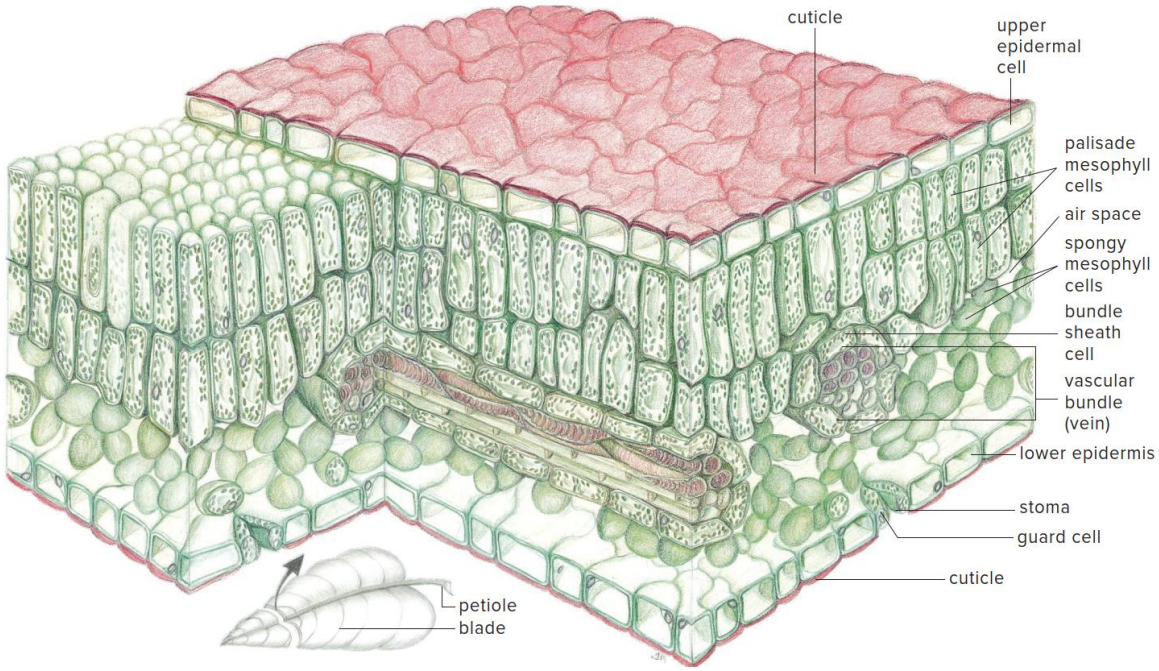


Figure 63: Vue stéréoscopique d'une portion d'une feuille typique.

4.2.Mésophylle

Le mésophylles est l'ensemble des tissus internes à l'épiderme des feuilles, où la photosynthèse se déroule principalement. Ce tissu est constitué de deux parties principales : le parenchyme palissadique et le mésophylles spongieux (Figure 64). Le parenchyme palissadique, situé sur la face supérieure de la feuille, est le principal tissu photosynthétique des plantes. Il est composé de cellules parenchymateuses compactes, souvent disposées en deux rangées, et abrite généralement plus de 80 % des chloroplastes de la feuille. Ces cellules sont légèrement espacées, ce qui permet une grande surface exposée aux

espaces intercellulaires, favorisant ainsi l'absorption du dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse. Ce parenchyme est généralement constitué d'une seule couche de cellules, bien qu'il puisse atteindre trois ou quatre couches dans les zones où la lumière solaire est plus intense.

Sous le parenchyme palissadique se trouve le parenchyme spongieux (lacuneux), un tissu plus lâche et aéré qui permet une diffusion rapide du dioxyde de carbone à partir des stomates vers les différentes parties internes de la feuille (Figure 65). Ce tissu empêche les molécules de dioxyde de carbone de rebondir sur les cellules et de s'échapper des stomates. Les cellules du mésophylles spongieux sont également riches en chloroplastes. Dans certaines plantes, le parenchyme palissadique peut être présent sur les deux faces de la feuille, tandis que le mésophylles spongieux peut être central ou absent.

Les cellules de parenchyme contenant des chloroplastes sont appelées chlorenchyme, un tissu présent non seulement dans les feuilles mais aussi dans les parties externes des tiges des plantes herbacées. À l'intérieur de la feuille, les surfaces des cellules en contact avec l'air sont humides. Si l'humidité baisse sous un seuil critique, les stomates se ferment, limitant ainsi la perte d'eau par évaporation.

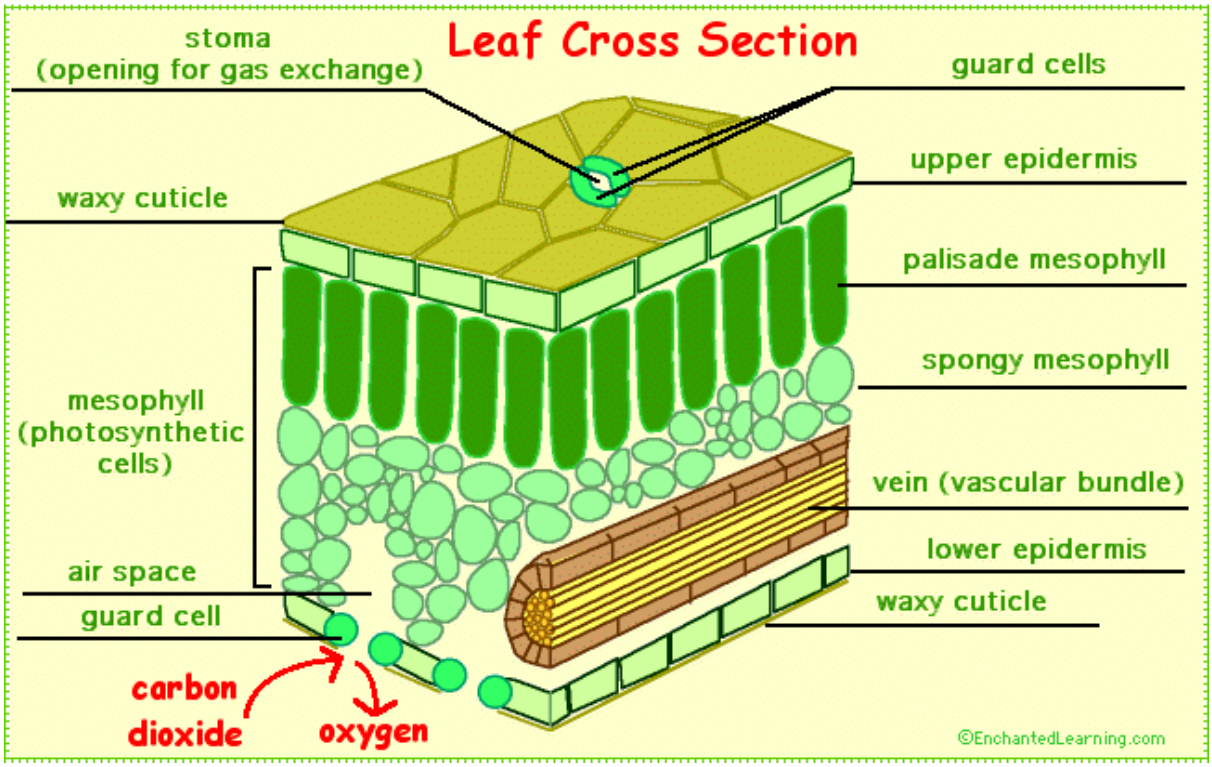


Figure 64: Coupe transversale d'une feuille

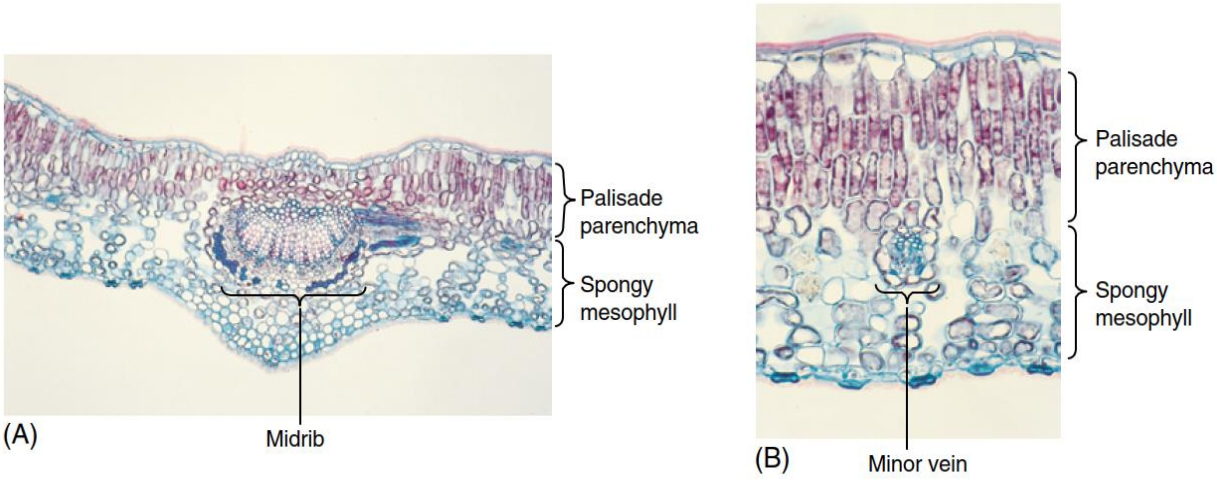


Figure 65: Feuilles de houx (Ilex)

4.3. Tissus vasculaires

Les tissus vasculaires sont répartis dans tout le mésophylles et se composent de xylème et de phloème, entourés d'une couche de cellules parenchymateuses épaissies appelée faisceaux (Figure 66). Ces veines, qui forment le "squelette" de la feuille, sont essentielles au transport de l'eau et des nutriments. Le phloème transporte les sucres et autres glucides à travers la plante, tandis que le xylème transporte l'eau, parfois depuis des hauteurs supérieures à 100 mètres. Les veines forment un réseau complexe qui traverse la plante, particulièrement visible dans les dicotylédones où les veines se croisent souvent sous différentes formes : transversale, longitudinale ou tangente dans une même coupe transversale. Dans les monocotylédones, les veines sont parallèles et il n'y a généralement pas de distinction entre les couches palissadiques et spongieuses du mésophylles.

Certaines feuilles de monocotylédones, comme celles des graminées, possèdent de grandes cellules bulliformes à parois minces situées de chaque côté de la nervure principale. Sous des conditions sèches, ces cellules s'effondrent partiellement, entraînant le repli ou le roulis de la feuille. Ce phénomène permet de réduire la transpiration en limitant l'exposition à l'air sec.

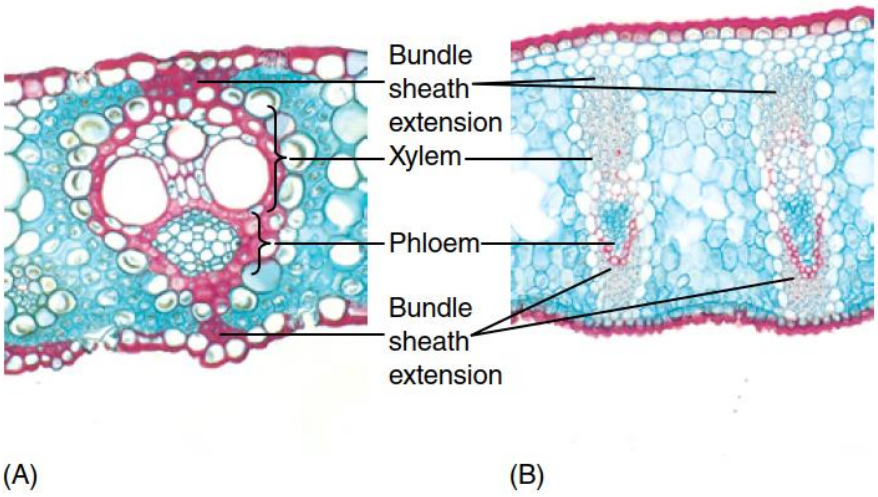


Figure 66: (A) Feuilles de canne à sucre.

(B) Les feuilles de lin présentent de grandes extensions de gaine de faisceau.

5. Pétiole

Le pétiole est une structure qui relie la feuille à la tige, et son rôle est crucial dans la distribution des nutriments et de l'eau entre la tige et la lamelle de la feuille. Il contient des tissus variés, notamment un mésophylles semblable au cortex, et des faisceaux vasculaires qui se ramifient à partir des faisceaux de la tige, formant des traces foliaires. Ces faisceaux peuvent fusionner ou rester distincts et sont disposés de différentes manières, ce qui peut influencer la distribution des sucres et autres nutriments dans la feuille (Figure 67).

Le pétiole peut également porter des stipules, de petites excroissances de tissu qui jouent un rôle protecteur pour le méristème apical de la pousse lorsque la feuille est jeune. Chez certaines plantes, les stipules participent à la photosynthèse, mais elles se réduisent généralement à de petites structures une fois la feuille adulte. Les motifs de faisceaux vasculaires dans le pétiole, bien que mal compris, semblent jouer un rôle dans l'efficacité des échanges et la structuration de la feuille.



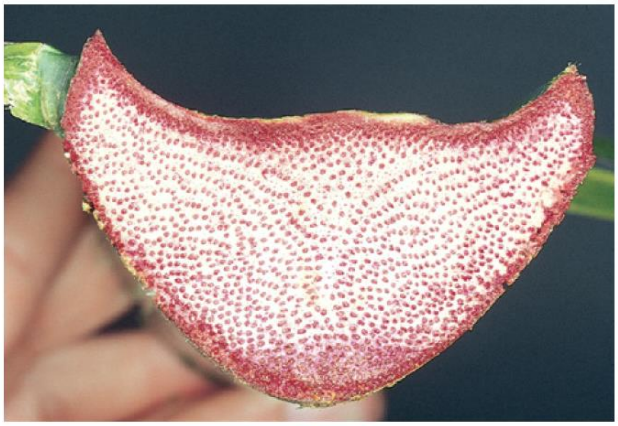




Figure 67: Dans une coupe de tige, 11 faisceaux sont visibles (en rouge)

(B) Faisceaux vasculaires dans le pétiole du palmier Attalea.
(C) Chez les cactus, les traces vers les feuilles et bourgeons axillaires sont longues et complexes en raison de l'épaisseur du cortex.

Fleurs

1. Structure d'une fleur

Toutes les fleurs partagent des caractéristiques de base, ils se compose de plusieurs parties différentes, chacune ayant une fonction spécifique (Figure 68). Une fleur typique se développe à partir d'un primordium embryonnaire en un bouton et se forme au bout d'un pédoncule. Si la fleur est seule, ce pédoncule est appelé pédicelle. L'extrémité du pédoncule gonfle pour former un réceptacle auquel les autres parties de la fleur sont attachées.

Le verticille extérieur est composé de sépales, souvent verts, qui forment le calice et protègent la fleur en bouton. Le verticille suivant est constitué de pétales, collectivement appelés corolle, qui attirent les pollinisateurs. Certaines fleurs ont des pétales fusionnés en une seule structure.

Les étamines sont attachées autour du pistil au centre de la fleur. Chaque étamine est composée d'un filament et d'une anthère, qui libère le pollen. Le pistil, souvent en forme de vase, se compose du stigmate, du style et de l'ovaire. L'ovaire se transforme ensuite en fruit.

L'ovaire peut être supérieur ou inférieur selon son positionnement par rapport au calice et à la corolle. L'ovaire contient des ovules, qui deviendront des graines après fécondation.

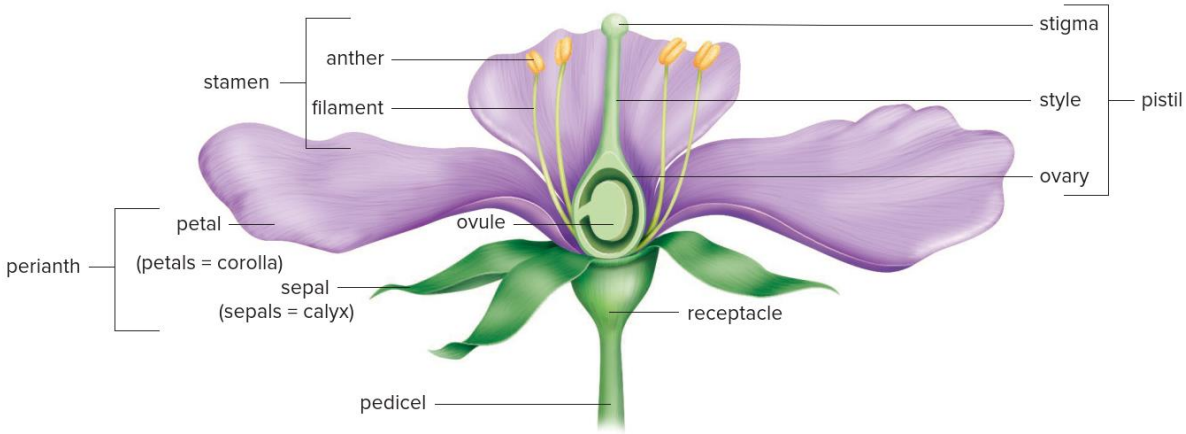


Figure 68: Morphologie d'une fleur typique

Certaines fleurs, comme celles des pêchers, sont produites individuellement, tandis que d'autres, comme le lilas ou le raisin, forment des inflorescences, des groupes de fleurs qui s'ouvrent simultanément ou de manière progressive (Figure 69).

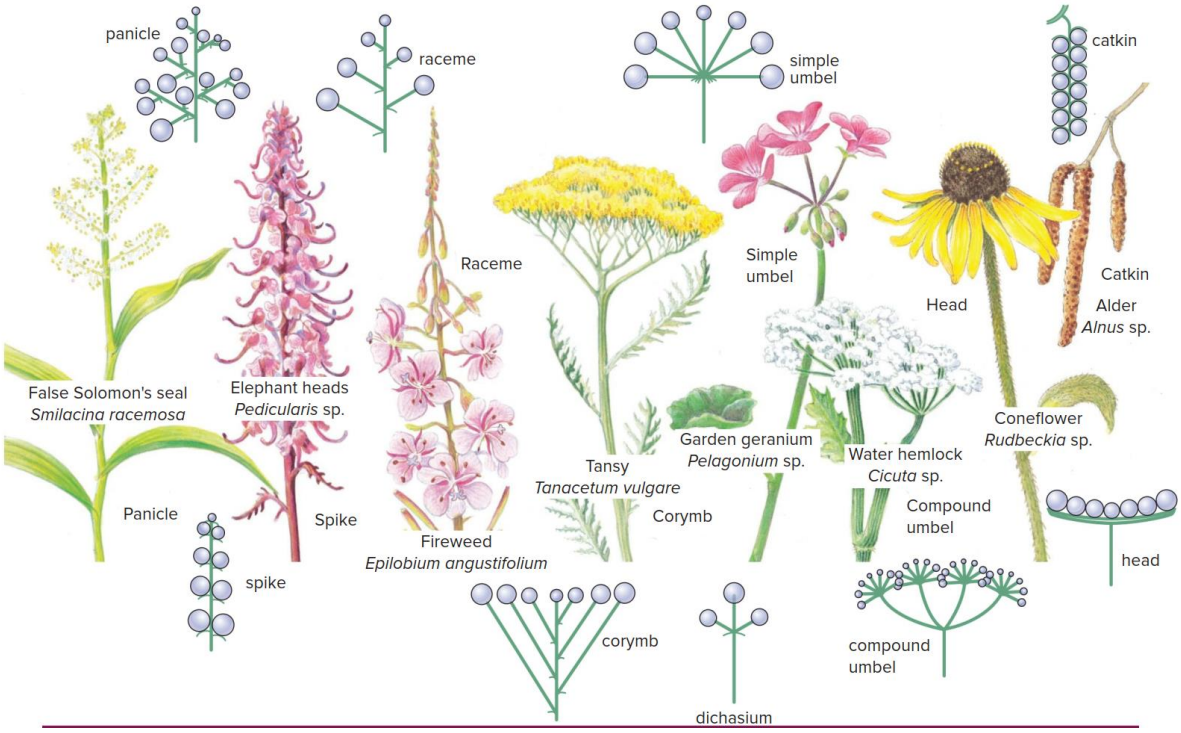


Figure 69: Les types d'inflorescences. Chaque cercle représente une fleur. Dans toutes les inflorescences montrées, à l'exception du **dichasium** et du **chaton**, les fleurs les plus basses ou les plus externes s'ouvrent en premier. Ensuite, les fleurs s'ouvrent successivement vers le haut ou vers l'intérieur. Dans un **dichasium**, la fleur centrale s'ouvre en premier, tandis que les fleurs latérales s'ouvrent simultanément. Dans un **chaton**, toutes les fleurs s'ouvrent simultanément.

1.1. Le périanthe

Le périanthe désigne l'ensemble des parties stériles de la fleur, constitué de deux ensembles principaux : la corolle et le calice.

Le calice

Le calice est formé par les sépales, souvent verts, situés à la base de la fleur. Il peut adopter différentes configurations : si les sépales sont séparés, on parle de calice dialysépale, tandis que s'ils sont fusionnés, il s'agit d'un calice gamosépale. Le calice peut persister après la floraison jusqu'à la maturation du fruit, auquel cas on le qualifie de persistant, ou il peut disparaître après l'épanouissement de la fleur, dans ce cas on dit qu'il est caduc.

La corolle

La corolle est constituée des pétales, généralement colorés et plus grands que les sépales, qui se trouvent au-dessus de ces derniers. Lorsqu'ils sont distincts, on parle de fleurs dialysépales, tandis que si les pétales sont soudés entre eux, on parle de fleurs gamosépales. Parfois, les sépales et les pétales ressemblent aux mêmes parties de la plante, dans ce cas, ils sont appelés tépales, et l'ensemble de ces tépales forme un périgone.

1.2. Les pièces fertiles

Les pièces fertiles sont les organes directement impliqués dans la reproduction, et elles comprennent également deux verticilles : l'androcée et le gynécée (Figure 70).

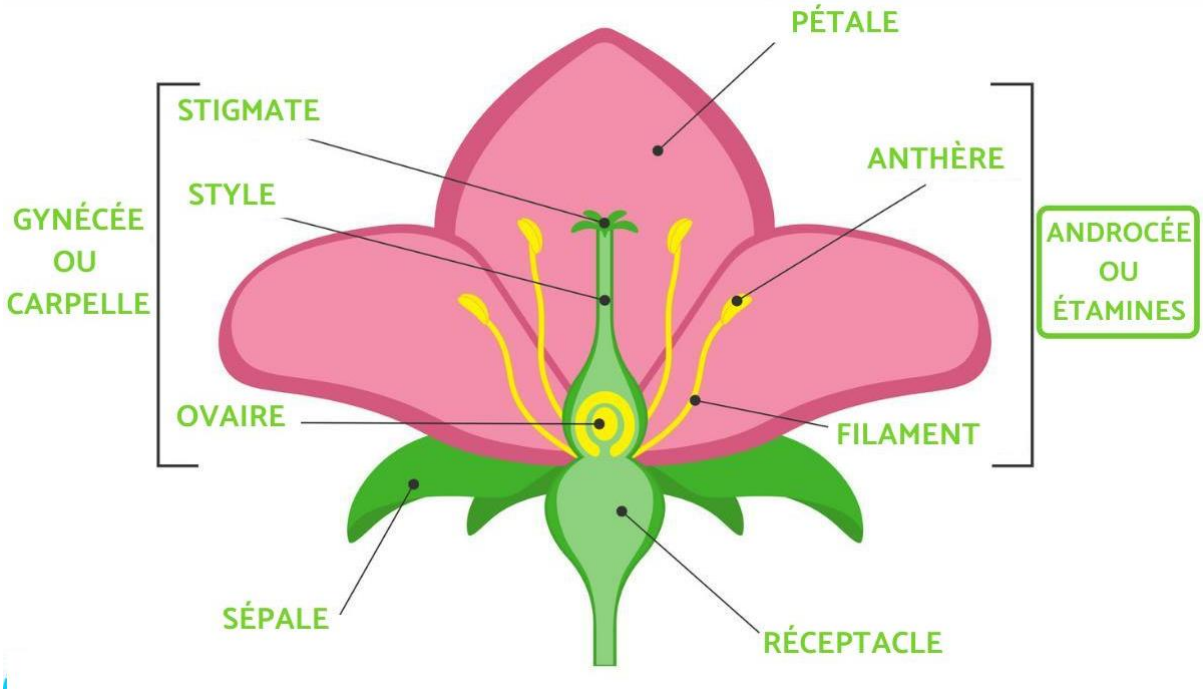


Figure 70: Pièces fertiles d'une fleur

L'androcée

L'androcée est l'organe reproducteur masculin de la fleur, constitué des étamines. Chaque étamine se compose de deux parties : une anthère, qui peut avoir différentes formes, souvent constituée de deux thèques reliées par un connectif, prolongement du filet. Chaque thèque contient deux sacs polliniques. Le pollen est libéré par déhiscence des anthères. L'anthère est fixée au réceptacle par un filament, structure fine et allongée. Il existe également des étamines stériles, appelées staminodes.

Le gynécée

Le gynécée, ou pistil, est l'organe reproducteur femelle et est formé par l'ensemble des carpelles. Chaque carpelle comprend :

- Le **stigmate**, qui est la partie supérieure élargie du carpelle, servant à retenir le pollen et à permettre au tube pollinique de se diriger vers l'ovaire.
- Le **style**, qui relie le stigmate à l'ovaire.
- L'**ovaire**, la partie basale renflée du carpelle, qui contient les ovules.

Les carpelles qui forment le gynécée peuvent être soit totalement fusionnés, partiellement soudés ou séparés.

Dans la majorité des fleurs, l'androcée et le gynécée sont présents, ce qui fait de la fleur une **fleur hermaphrodite** ou **bisexuée**. Cependant, certaines espèces sont **unisexuées**, portant uniquement un gynécée (fleurs pistillées) ou un androcée (fleurs staminées). Il existe aussi des fleurs stériles, qui ne possèdent ni étamines ni carpelles.

Si les fleurs mâles et femelles se trouvent sur un même individu, la plante est dite **monoïque**. Si elles se trouvent sur des individus séparés, la plante est qualifiée de **dioïque**.

1.3. Disposition de l'ovaire et des pièces florales

La manière dont l'ovaire et les autres parties de la fleur sont disposés peut donner naissance à différents types de fleurs (Figure 71). Lorsque le périanthe et les étamines sont positionnés sous l'ovaire, on parle de **fleur hypogyne**. Si le périanthe et les étamines sont insérés plus haut que l'ovaire, mais que ce dernier est encore partiellement inférieur, on parle de **fleur périgyne**. Enfin, si le périanthe et les étamines sont situés au-dessus de l'ovaire totalement inférieur, on parle de **fleur épigyne**.

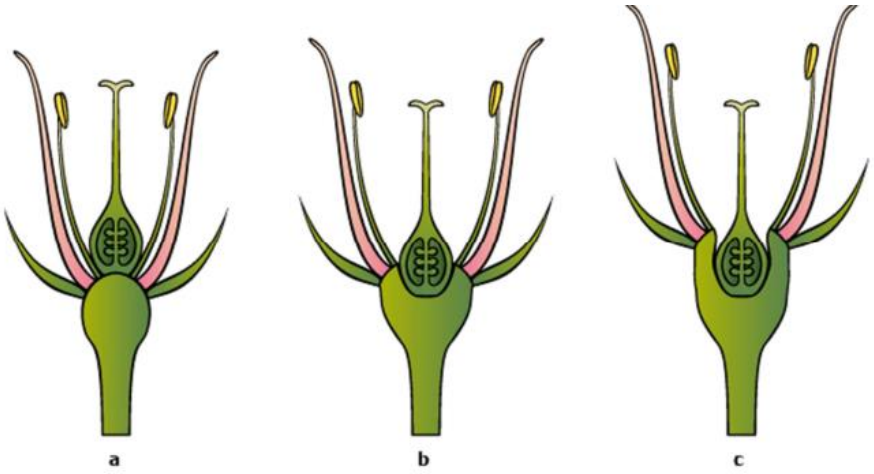


Figure 71: (a) ovaire supère (fleur hypogyne) – (b) ovaire semi-infère (fleur périgyne) – (c) ovaire infère (fleur épigyne)

Remarque :

Les fleurs peuvent aussi être classées en fonction du nombre de pièces florales et du nombre de verticilles (Figure 72) :

- **Exemple 1** : Chez les monocotylédones, on trouve des **fleurs trimères**, composées de 3 verticilles successifs, chacun comprenant 3 pièces.
- **Exemple 2** : Chez les dicotylédones, on distingue plusieurs types de fleurs :
    - **Fleurs tétramères** : Composées de 4 verticilles successifs, chaque verticille contenant 4 pièces.
    - **Fleurs pentamères** : Composées de 5 verticilles successifs, chaque verticille contenant 5 pièces.
    - **Fleurs polymères** : Composées de plusieurs verticilles successifs, chacun ayant un nombre variable de pièces.

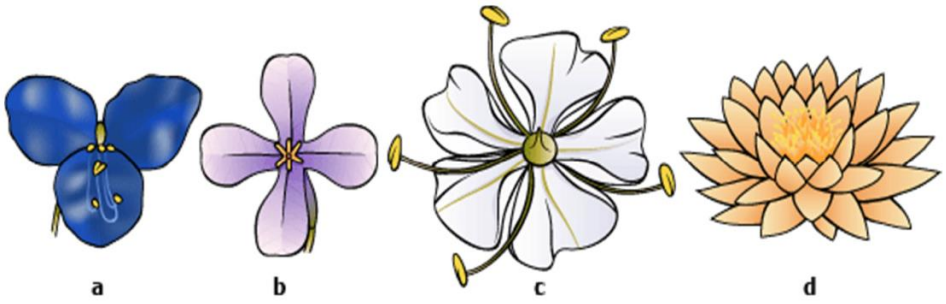


Figure 72: Nombre de pièces florales par verticille : a. trimère - b. tétramère - c. pentamère – d. polymère

Fruits

D'un point de vue botanique, un fruit est défini comme étant l'ovaire d'une fleur et ses parties accessoires ayant mûri et souvent contenant des graines. Selon cette définition, des aliments couramment appelés légumes, tels que les tomates et les concombres, sont en réalité des fruits

Les légumes, quant à eux, peuvent être constitués de feuilles (ex. laitue, chou), de pétioles de feuilles (ex. céleri), de feuilles spécialisées (ex. oignon), de tiges modifiées (ex. pomme de terre), de racines (ex. patate douce), de tiges et de racines (ex. betteraves), de fleurs et de leurs pédoncules (ex. brocoli), de boutons floraux (ex. artichaut), ou d'autres parties de la plante.

Tous les fruits proviennent des ovaires des fleurs et se retrouvent uniquement dans les plantes à fleurs. La fécondation joue un rôle clé dans ce développement, car sans fécondation, la fleur meurt généralement sans devenir un fruit. Des hormones spécifiques, contenues dans les grains de pollen, déclenchent parfois ce développement, et les graines en développement produisent des hormones favorisant la croissance du fruit. Enfin, certaines plantes, comme les bananes cultivées, peuvent produire des fruits sans fécondation, un phénomène connu sous le nom de parthénocarpie.

1. Régions des fruits

Les fruits mûrs sont généralement composés de trois régions principales (Figure 73), qui peuvent parfois se fondre, rendant leur distinction difficile. **L'exocarpe** correspond à la peau, tandis que **l'endocarpe** entoure la graine et peut varier en texture (dur comme un noyau de pêche, papyracé comme dans les pommes, ou indifférencié du **mésocarpe**, le tissu charnu entre les deux). Ensemble, ces trois régions forment le **péricarpe**. Les fruits secs ont un péricarpe généralement plus mince. Certains fruits ne contiennent que l'ovaire et ses graines, tandis que d'autres incluent des parties adjacentes de la fleur, comme le réceptacle ou le calice, qui peuvent être fusionnées avec l'ovaire.

Selon leur maturité, les fruits peuvent être charnus ou secs, se fendre ou non, et provenir d'un ou de plusieurs ovaires.

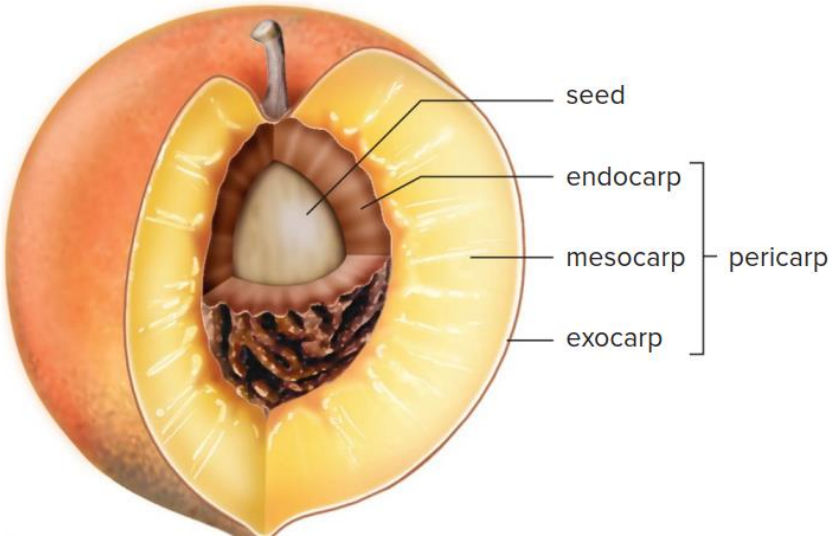


Figure 73: Les régions d'un fruit mature

2. Les différents types de fruits

2.1.Fruits simples

Suite à la fécondation, un fruit véritable (ou simple) se forme à partir du gynécée d'une seule fleur. Ce gynécée peut être constitué d'un seul carpelle ou de plusieurs carpelles fusionnés. Certains botanistes estiment que si un autre élément que le gynécée intervient dans la formation du fruit, ce dernier est qualifié de faux-fruit. Lors de la formation du fruit, la paroi de l'ovaire, qui donnera le péricarpe, se modifie en fonction de sa consistance :

- Elle peut se gorger de réserves et devenir épaisse et juteuse, formant ainsi un fruit **charnu**.
- Elle peut également se dessécher, devenir fibreuse et plus ou moins dure, ce qui donne un fruit **sec**.

2.1.1. Fruits charnus

Un fruit charnu est un fruit véritable dont le péricarpe est riche en réserves, devient épais et juteux. Il existe deux types de fruits charnus, selon que l'endocarpe soit charnu ou lignifié (Figure 74). On distingue :

a. **La baie** ou fruit à pépins : Ce fruit charnu possède un endocarpe charnu. Son épicarpe est généralement mince, tandis que le mésocarpe et l'endocarpe sont charnus, ce qui permet aux graines de se trouver libres dans la chair du fruit. L'épicarpe constitue la peau du fruit, le mésocarpe la chair, et l'endocarpe entoure les graines pour former les pépins. Exemples : l'orange, le raisin, la

tomate, le melon. Les baies possèdent généralement plusieurs graines (polyspermes), comme dans le cas des agrumes où l'endocarpe présente des poils charnus riches en réserves, et le mésocarpe est peu développé et de couleur blanche.

b. **La drupe** ou fruit à noyau : Ce fruit charnu est indéhiscent, avec un endocarpe lignifié qui entoure une seule graine, formant ainsi un noyau. La drupe est généralement monosperme (formée à partir d'un seul ovaire), comme la cerise ou la pêche.

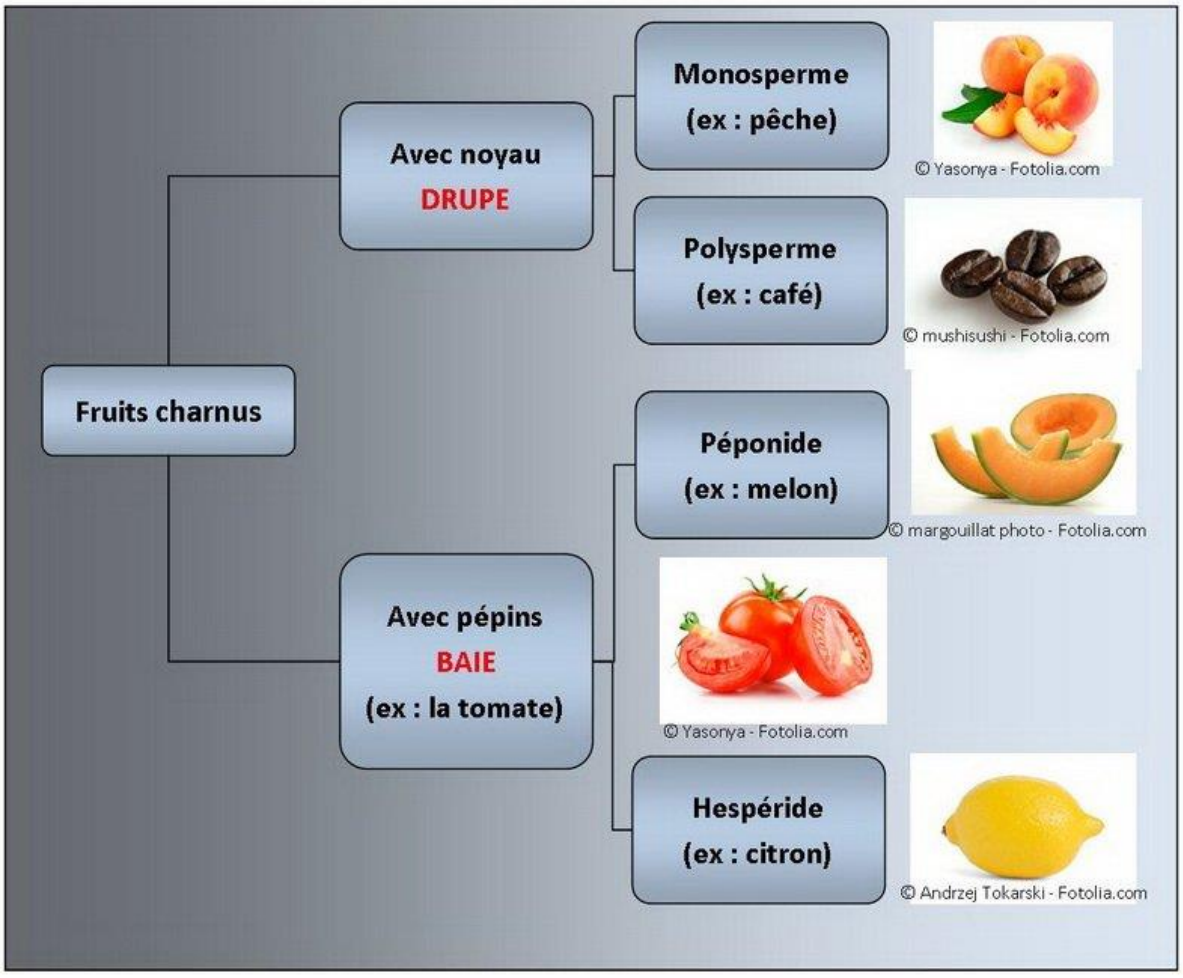


Figure 74: Les fruits charnus à noyaux et à pepins

2.1.2. Fruits secs

Les fruits secs se forment lorsque le péricarpe se dessèche et devient fibreux ou dur. Ils se divisent en deux catégories :

a. **Fruits secs indéhiscents** : Ce sont des fruits qui ne s'ouvrent pas spontanément pour libérer leurs graines. La graine est généralement libre à l'intérieur du fruit. Parmi les fruits secs indéhiscents (Figure 75), on trouve :

1. **Le caryopse** : Fruit typique des graminées, il se distingue par la soudure des téguments de la graine au péricarpe.
2. **Les akènes** : Ces fruits contiennent une seule graine, souvent protégée par une cupule. Exemples : noisette, châtaigne, et les fruits des astéracées.
3. **Les samares** : Ce sont des akènes qui portent des ailes permettant leur dispersion par le vent. Exemple : orme, érable. La disamare possède deux ailes.

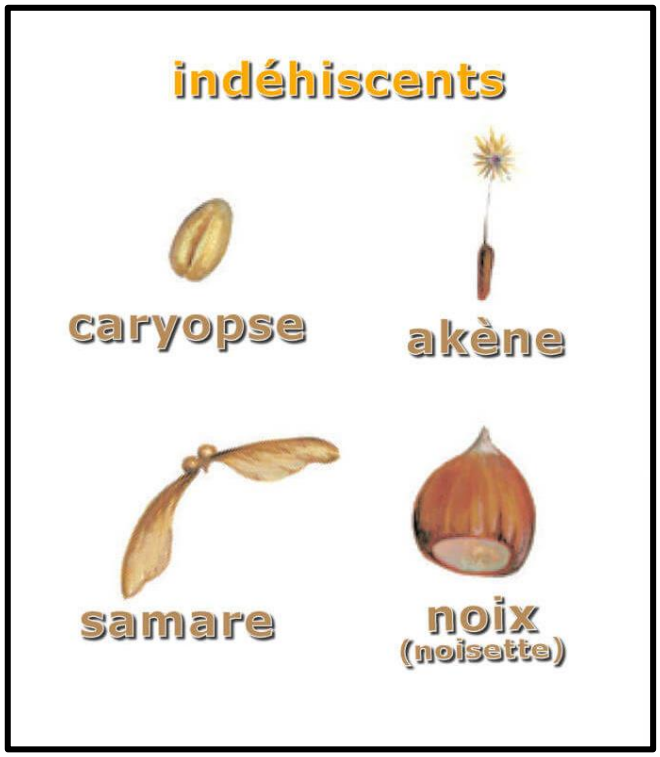


Figure 75: Les différents fruits secs indéhiscents

b. **Fruits secs déhiscents** : Ces fruits s'ouvrent à maturité pour libérer leurs graines. La déhiscence se fait généralement longitudinalement par rapport à l'axe du fruit (Figure 76). Les fruits secs déhiscents comprennent :

1. **La silique** : Fruit sec formé d'un ovaire composé de deux carpelles seulement, s'ouvrant par quatre fentes, et libérant deux valves avec une fausse cloison médiane, d'origine placentaire, où les graines sont fixées. Exemples : giroflée, moutarde.

2. **La capsule** : Fruit provenant d'un ovaire composé de plusieurs carpelles soudés, qui peut s'ouvrir de diverses manières, soit par plusieurs fentes, soit par des pores, ou encore en formant un couvercle qui se détache (pyxide). Exemple : pavot.
3. **Le follicule** : Fruit d'un seul carpelle qui s'ouvre par une fente. Exemple : hellébore.
4. **La gousse** : Fruit provenant d'un seul carpelle mais qui s'ouvre par deux fentes, libérant ainsi deux valves sur lesquelles sont fixées les graines. Fruit typique des Fabacées, comme le haricot ou la vanille.

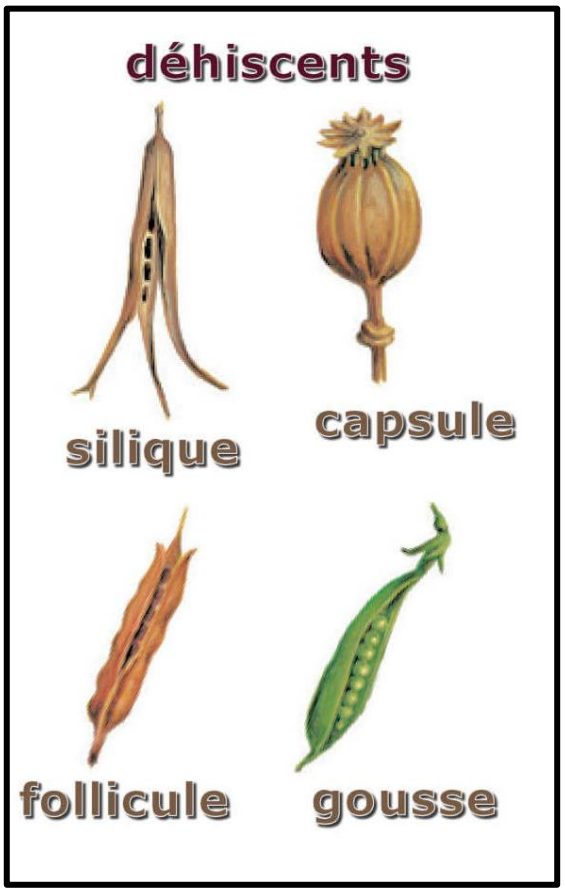


Figure 76: Les différents fruits secs déhiscents

2.2.Le faux fruit

2.2.1. Fruits multiples

Les fruits multiples proviennent de plusieurs fleurs individuelles dans une inflorescence. Chaque fleur a son propre réceptacle, mais les fruits se développent ensemble pour former un fruit unique, comme les mûres, les oranges de l'Osage, les ananas et les figues (Figure 77).



Figure 77: Les oranges de l'Osage (Maclura), représentant des fruits multiples. Les ovaires mûrs de nombreuses fleurs se rejoignent pour former une unité unique.

2.2.2. Fruits complexes

Les fruits complexes ne proviennent pas uniquement du gynécée, mais intègrent d'autres parties de la fleur (réceptacle, pièces périanthaires, etc.). Exemples : la fraise, la pomme, la poire. Dans la fraise, par exemple, le réceptacle floral se développe considérablement pour former la partie charnue du fruit, tandis que les carpelles se transforment en akènes fixés sur ce réceptacle volumineux. Dans le cas de la pomme ou de la poire, l'ovaire infère est soudé au réceptacle floral, et le fruit comprend un mésocarpe charnu provenant en partie du réceptacle hypertrophié et, en partie, de la paroi externe des carpelles. L'endocarpe, lui, se forme à partir de la paroi interne des anciennes loges carpellaires (Figure 78).

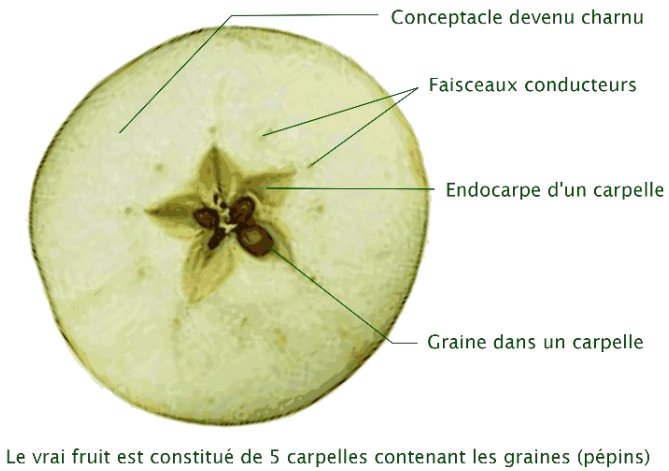


Figure 78: Coupe transversale d'une pomme

2.2.3. Fruits composés

Les fruits composés sont formés à partir d'une inflorescence, et donc constitués de plusieurs fleurs. Dans ce cas, le fruit est appelé une infrutescence. Exemples : ananas, figue. L'ananas est une infrutescence charnue dont les différentes parties sont soudées les unes aux autres (Figure 79).

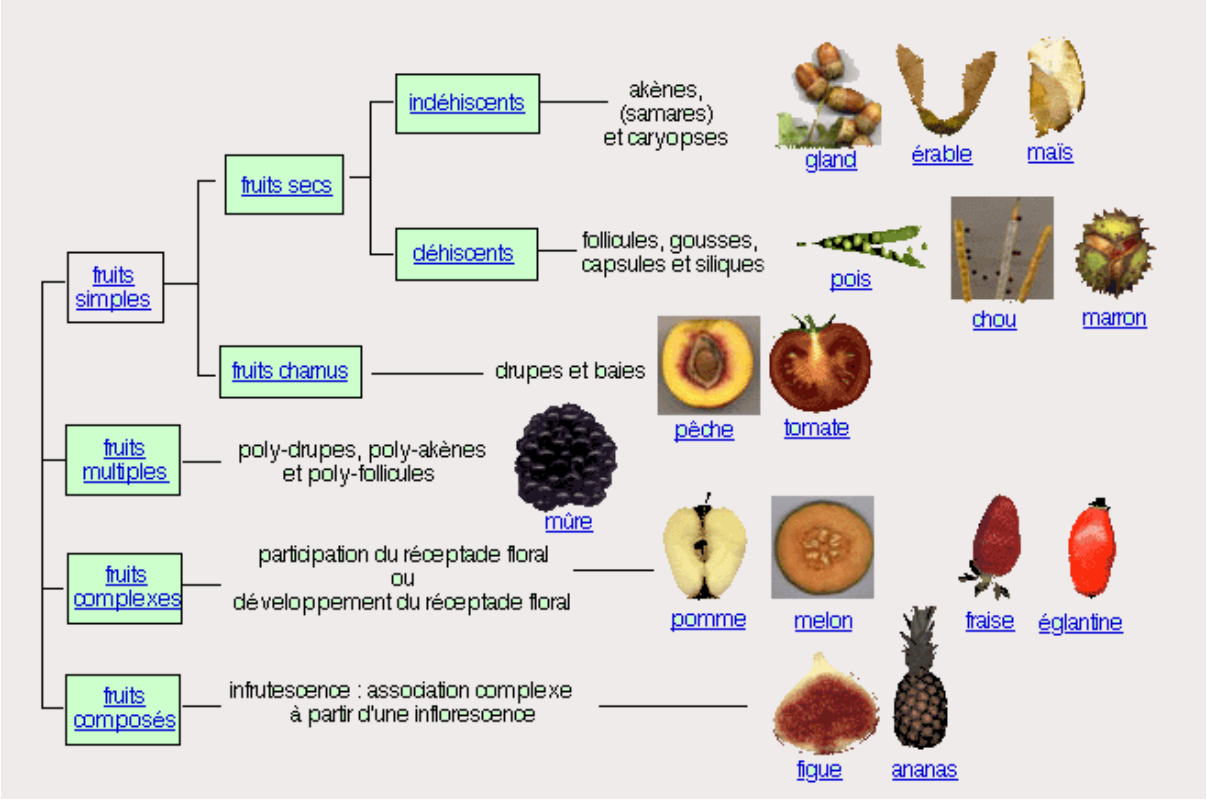


Figure 79: Les différents types de fruits

Graines

1. Structure des graines

Les **graines** sont des structures dérivées des ovules des plantes, formées après la fécondation (Figure 80). Elles conservent la forme générale de l'ovule, bien que leur taille puisse varier selon les espèces. Une graine se compose principalement de plusieurs parties distinctes :

1. **Le tégument** : L'enveloppe externe de la graine, qui protège les tissus internes. Sa texture peut être lisse, hérissée de poils ou pourvue de crêtes. Ce tégument joue un rôle dans la protection de la graine et parfois dans sa dissémination.
2. **Le hilium** : Sur le côté concave de certaines graines (comme le haricot), on trouve une petite cicatrice blanche appelée le **hilium**, marquant l'endroit où l'ovule était attaché à l'ovaire.
3. **Le micropyle** : À côté du hilium, se situe un petit pore appelé le **micropyle**, qui permet à la graine d'absorber de l'eau pour démarrer la germination.
4. **L'embryon** : Partie centrale de la graine, constituée de la **radicule** (future racine), du **plumeau** (futur bourgeon), et des **cotylédons** (premières feuilles). Le nombre de cotylédons varie selon les types de plantes : une graine de **monocotylédone** en a un seul, tandis qu'une graine de **dicotylédone** en a deux. Ces cotylédons servent souvent de réservoirs nutritifs pour la plantule.
5. **L'albumen** : C'est un tissu nutritif qui peut entourer l'embryon. Il peut être très développé (comme dans les graines à albumen, par exemple les céréales) ou presque absent (comme dans les graines exalbuminées, telles que le haricot). L'albumen fournit des nutriments essentiels à la graine avant que la photosynthèse ne commence.

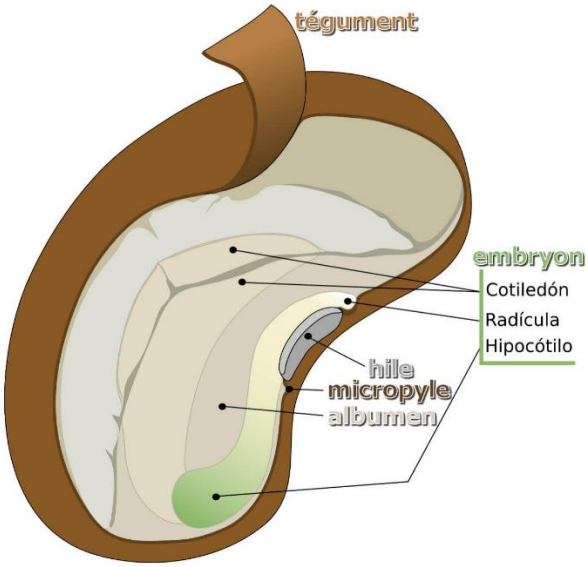


Figure 80: Morphologie d'une graine de haricot

Les graines peuvent être classées en 3 catégories selon la présence ou l'absence d'albumen (Figure 81):

- **À périsperme** : Les réserves sont contenues dans le périsperme (par exemple, le poivre).
- **Albuminées** : Les réserves sont contenues dans l'albumen (par exemple, le maïs).
- **Exalbuminées** : Les réserves sont stockées dans les cotylédons (par exemple, le haricot).

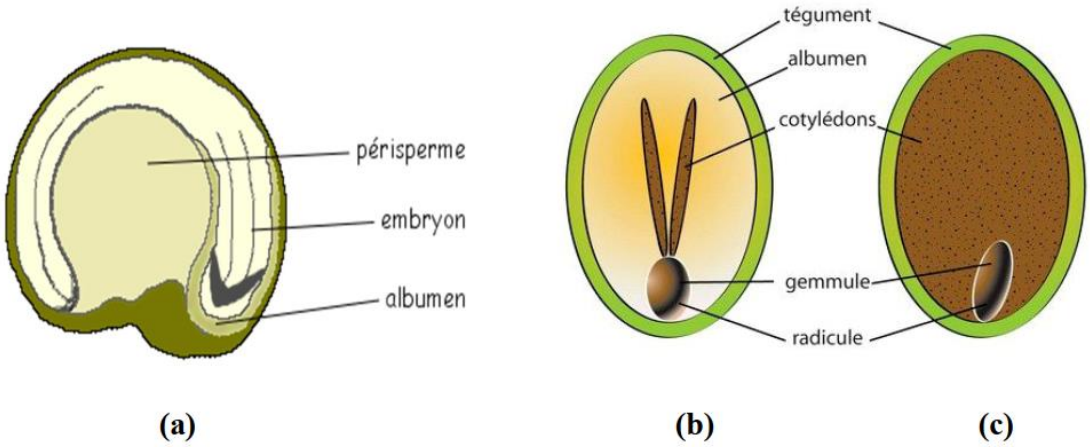


Figure 81: Schéma d'une graine à périsperme (a), albuminée (b), exalbuminée (c)

2. Germination

La **germination** est le processus par lequel une graine commence à croître après avoir été semée, initiant le développement d'une nouvelle plante (Figure 82, 83). Elle comprend plusieurs étapes et dépend de la viabilité de la graine ainsi que des conditions environnementales favorables.

- **Imbibition d'eau** : La graine absorbe de l'eau, ce qui provoque son gonflement et la fissuration de son tégument. Cela réhydrate les cellules et prépare la graine à entamer son métabolisme.
- **Activation des enzymes** : L'imbibition active les enzymes qui commencent à décomposer les réserves nutritives (protéines, graisses, amidons) en substances solubles, fournissant ainsi les nutriments nécessaires à l'embryon.
- **Croissance de l'embryon** : L'embryon se développe, la radicule se transforme en racine, et le plumeau devient le bourgeon. Les cotylédons émergent et commencent à fournir des nutriments pour soutenir la croissance, en attendant que la photosynthèse prenne le relais.

Pour que la germination se produise, la graine a besoin d'eau, d'oxygène et souvent de températures adéquates. Dans certains cas, des conditions spécifiques (par exemple, froid ou pluies abondantes) sont nécessaires pour briser la dormance et initier la germination.

Selon la plante, il existe différents types de germination. Chez les **haricots** (dicotylédones), la germination est **épigée** (les cotylédons émergent du sol), tandis que chez les **pois**, elle est **hypogée** (les cotylédons restent sous le sol).

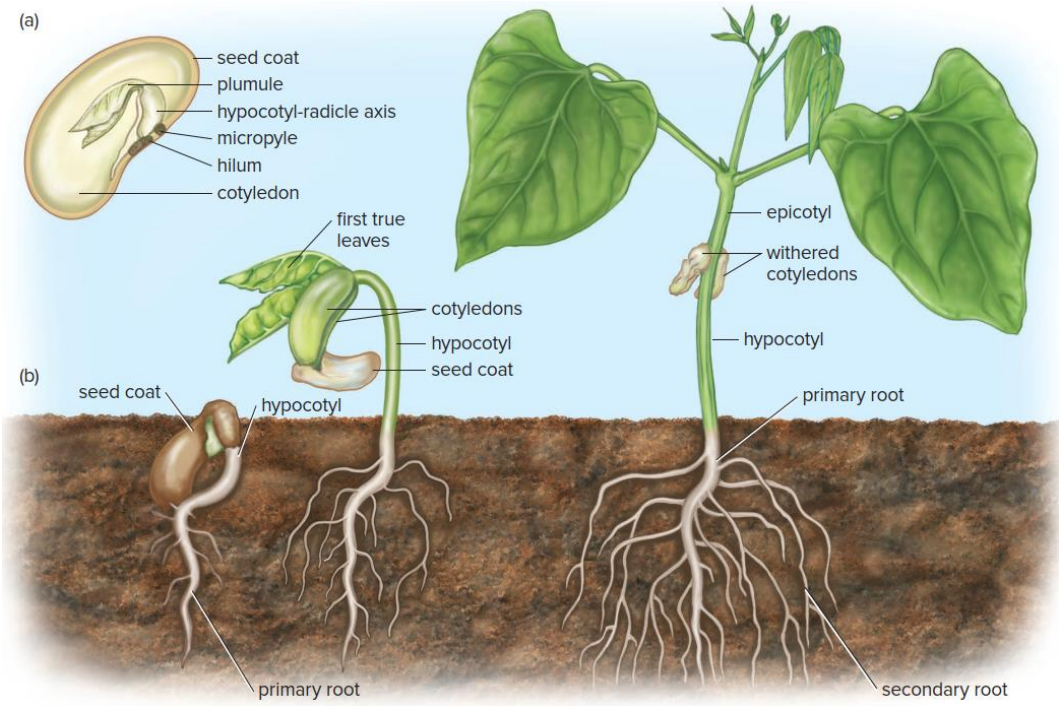


Figure 82: Graine dicot ; (a) Structure de la graine. (b) Germination et développement du plant

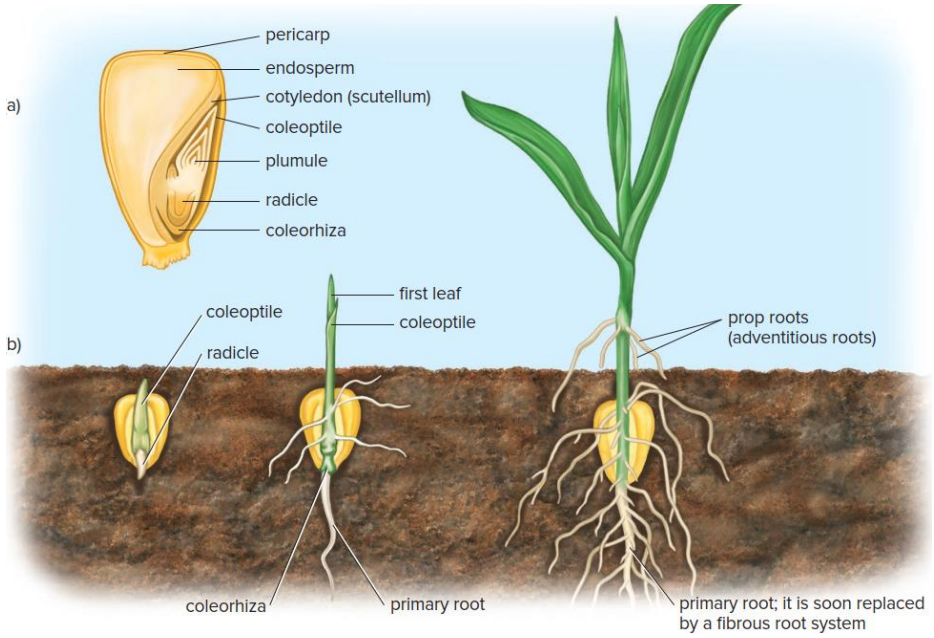


Figure 83: Graine monocot de maïs ; (a) Structure de la graine. (b) Germination et développement du plant

CHAPITRE 4

LA REPRODUCTION CHEZ LES ANGIOSPERMES

Chapitre 4 : La reproduction chez les Angiospermes

Gamétogenèse

La **gamétogenèse** est un processus fondamental de la reproduction sexuée chez les plantes, conduisant à la formation des gamètes, ces cellules haploïdes responsables de la génération de nouvelles plantes. Ce processus varie selon le sexe des gamètes et peut être divisé en deux types : **la gamétogenèse mâle** et **la gamétogenèse femelle**. Chez les **Angiospermes**, ces deux processus se produisent respectivement dans les **anthères des étamines** (pour la gamétogenèse mâle) et dans les **ovules** de l'ovaire (pour la gamétogenèse femelle).

1. La Gamétogenèse Mâle ou Microgamétogenèse

Chez les Angiospermes c'est la formation du **gamétophyte mâle** (grains de pollen) à l'intérieur des anthères (étamine). Le pollen se forme dans les loges polliniques des anthères. Il prend généralement une forme sphérique et est constitué d'une cellule végétative plus grande, riche en organites, entourée d'une double paroi. Cette paroi est composée d'une couche externe, l'exine, et d'une couche interne, l'intine. À l'intérieur, on trouve une cellule plus petite, moins dotée en organites, qui est désignée comme cellule reproductrice ou génératrice (Figure 84).

1.1 Formation des Grains de Pollen

Le processus de formation des grains de pollen commence par la **microsporogénèse**, où une cellule-mère diploïde subit une méiose pour produire quatre **microspores** haploïdes, organisées en tétrade.

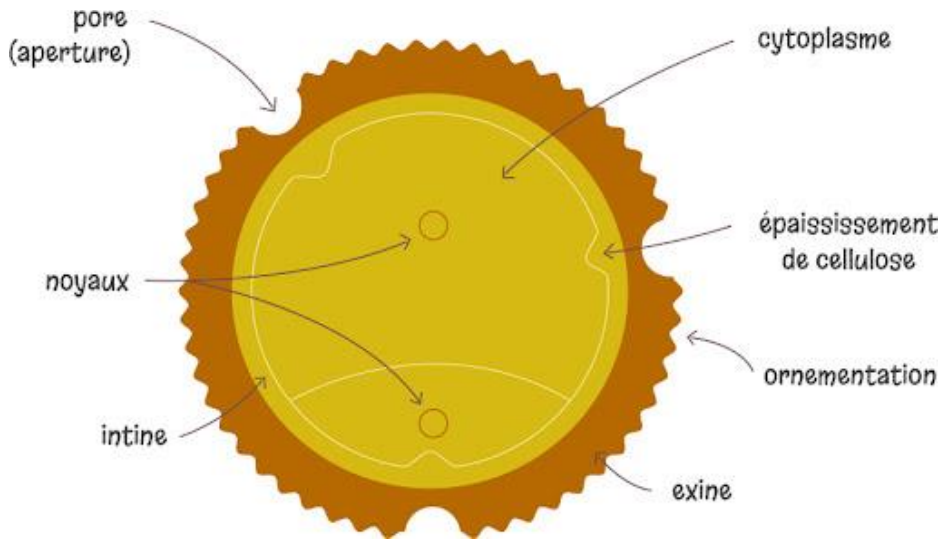


Figure 84: Structure du grain de pollen

1.2 Développement des Microspores

Les microspores subissent une **mitose asymétrique**, donnant naissance à deux cellules :

- **La cellule végétative**, responsable de la croissance du tube pollinique et de la survie du grain de pollen.
- **La cellule générative**, plus petite, qui donnera les **noyaux spermatiques** ou gamètes mâles.

Dans de nombreux cas, une deuxième division mitotique produit deux noyaux spermatiques avant la pollinisation, transformant le grain de pollen en une structure tricellulaire.

1.3 Libération du Pollen

Une fois formé, le grain de pollen est libéré de l'anthère et transporté par le vent ou les insectes. Il atterrit sur le **stigmate** de la fleur, où il commencera la croissance du tube pollinique, essentiel pour la fécondation (Figure 85).

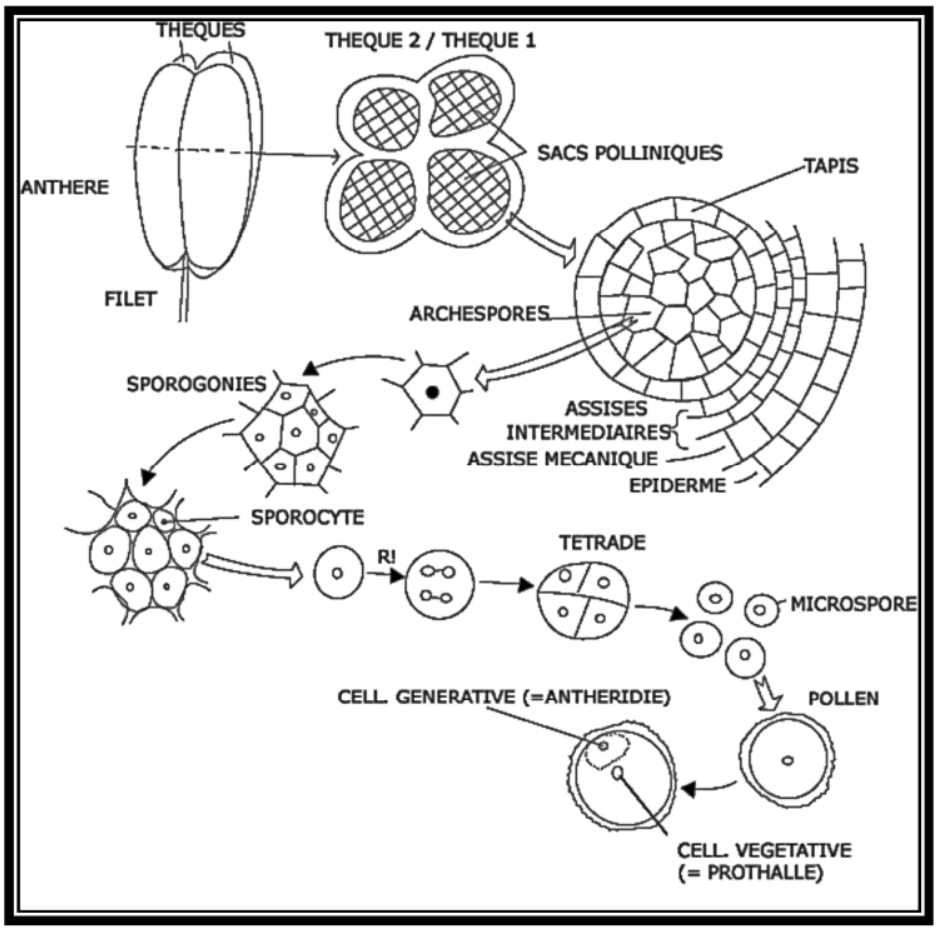


Figure 85: Formation du grain de pollen (microgamétogénèse)

2. La Gamétogenèse Femelle ou Mégagamétogenèse

La **mégagamétogenèse** concerne la formation du **gamétophyte femelle** ou **sac embryonnaire**, situé dans l'**ovule**. L'ovule se forme à partir du **nucelle**, un tissu interne de l'ovule, et est entouré de deux **téguments**. L'ovule est relié au **placenta** par le **funicule** (Figure 86).

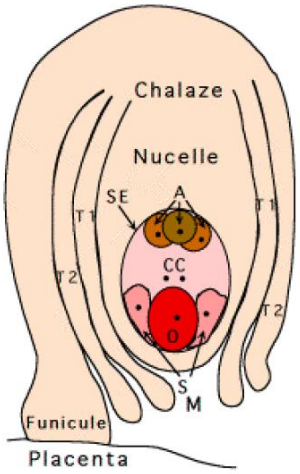


Figure 86: Schéma d'un ovule d'Angiosperme

Il existe trois types d'ovules selon leur orientation par rapport au funicule :

- **Ovules orthotropes** (droit),
- **Ovules campylotropes** (penchés),
- **Ovules anatropes** (reversés), ce dernier étant le plus fréquent.

2.1 La Formation du Sac Embryonnaire

La formation du sac embryonnaire commence par la différenciation d'une cellule appelée **archéspore** ou **cellule mère**. Cette cellule subit une **méiose**, produisant quatre **mégaspores** haploïdes. Trois de ces mégaspores dégénèrent, et la quatrième subit plusieurs divisions nucléaires successives pour former un **sac embryonnaire** avec huit noyaux haploïdes.

Ce sac embryonnaire est constitué de sept cellules (Figure 87) :

- **Trois antipodes**,
- **Une cellule centrale** avec deux noyaux polaires.
- **Deux synergides**,
- **Une oosphère** (gamète femelle),

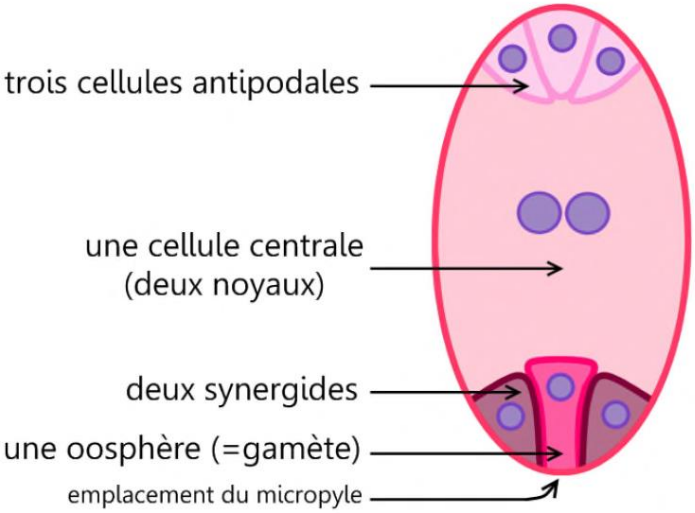


Figure 87: Schéma d'un Sac embryonnaire

Fécondation

La Fécondation chez les Angiospermes

1. La Pollinisation : Transfert des Gamètes Mâles

Le phénomène de **pollinisation** constitue la première étape essentielle de la reproduction sexuée chez les Angiospermes. Il correspond au transfert des **grains de pollen**, contenant les gamètes mâles, de l'organe reproducteur mâle, l'**étamine**, vers l'organe reproducteur femelle, le **pistil**. Cette étape peut se produire de deux manières : la pollinisation directe (ou **autopollinisation)**, où un grain de pollen fertilise le pistil de la même fleur, et **la pollinisation indirecte (ou croisée)**, où le pollen est transporté d'une fleur à une autre Figure n (Figure 88).

Lorsque la pollinisation se fait au sein de la même fleur ou entre les fleurs d'une même plante, on parle de **géintogamie** (ou autopollinisation). En revanche, lorsque le pollen provient d'une fleur d'une autre plante, cela est appelé **xénogamie** (ou pollinisation croisée), qui favorise la diversité génétique en permettant un mélange génétique entre différentes plantes.

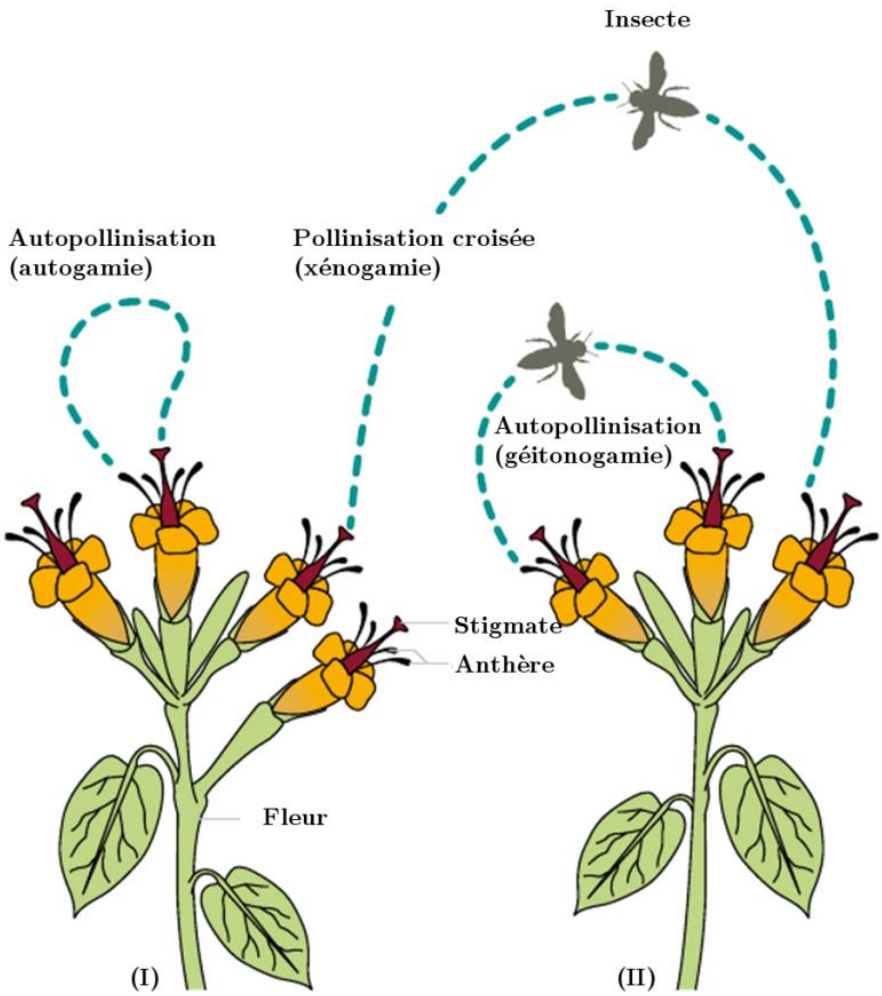


Figure 88: **I** : autopollinisation, **II** : pollinisation croisée

Le **transport du pollen** peut se faire par différents moyens. Le vent, étant léger et capable de déplacer le pollen facilement, est un vecteur important, d'où la **pollinisation anémophile**. Les **insectes**, attirés par la couleur et l'odeur des fleurs, jouent également un rôle majeur dans ce transfert, une méthode connue sous le nom de **pollinisation entomophile**. Certains types de fleurs sont même adaptées pour être pollinisées par les oiseaux, un phénomène qu'on appelle **pollinisation ornithophile**.

Les **glandes à nectar**, situées profondément dans les fleurs, favorisent l'attraction des insectes, assurant ainsi un transfert efficace du pollen vers le stigmate du pistil. Ce mécanisme permet d'augmenter les chances que le pollen atteigne le gamète femelle, l'**oosphère**, pour enclencher la fécondation.

2. Germination du Pollen : Du Stigmate à l'Ovule

Une fois le pollen déposé sur le **stigmate**, la surface recouverte de **papilles gluantes**, il s'hydrate, ce qui est crucial pour sa **germination**. Cette hydratation déclenche la formation d'un **tube pollinique**, qui s'allonge et traverse le **style** du pistil, permettant aux gamètes mâles de progresser vers l'**ovaire**. Ce tube pollinique contient les **spermatozoïdes**, les gamètes mâles, qui vont se diriger vers l'**ovule**, dans lequel réside le gamète femelle, l'**oosphère** (Figure 89).

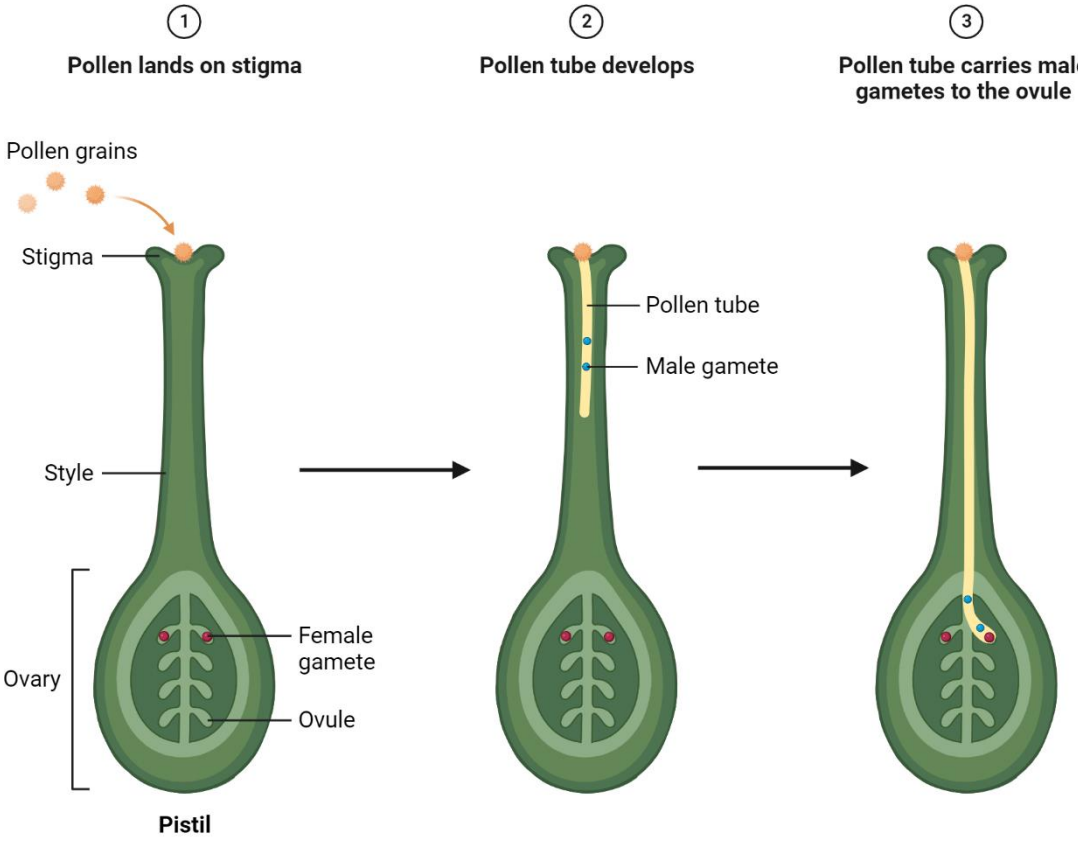


Figure 89: Germination du pollen

3. La Double Fécondation : Un Processus Unique

Une fois le tube pollinique arrivé à l'**ovule**, il traverse une **synergide** et libère les deux **spermatozoïdes**. Le premier spermatozoïde féconde l'**oosphère**, formant ainsi le **zygote** diploïde (2n), qui deviendra l'embryon de la plante. Le second spermatozoïde fusionne avec les **noyaux polaires** de la **cellule centrale** du sac embryonnaire, donnant naissance à une **cellule triploïde (3n)** qui

donnera l'**albumen**, un tissu nourrissant essentiel pour le développement de l'embryon (Figure 90).

Ce processus de **double fécondation** est spécifique aux **Spermaphytes** et se distingue par la création simultanée d'un embryon et d'un tissu nutritif, l'albumen. L'albumen, qui peut être entièrement absorbé au cours de la croissance de l'embryon, est essentiel à son développement avant la germination, en fournissant les réserves nécessaires à la croissance initiale de la plante.

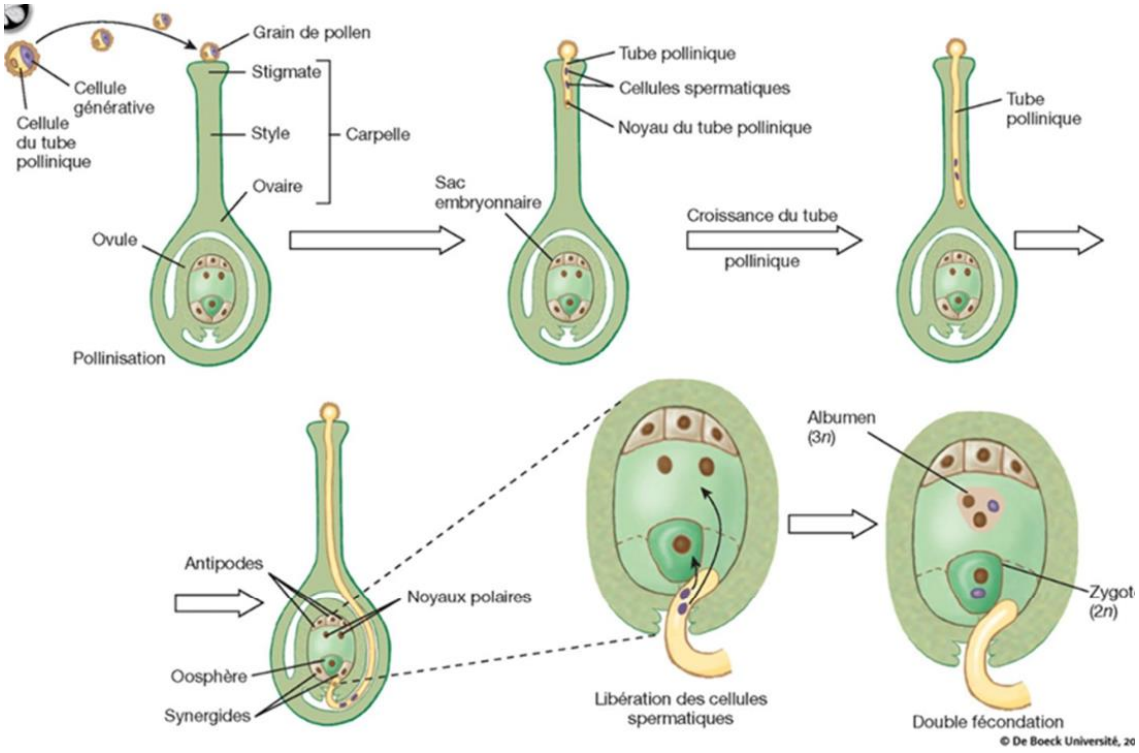


Figure 90 : Schéma du processus de la double fécondation

BIBLIOGRAPHIE

Botany: An Introduction to Plant Biology 6th Edition by James D. Mauseth

Introductory Plant Biology Edition Nine (14th Edition) (Kingsley R. Stern)

Biologie végétale 3éme édition (Jean-Claude Laberche)