

La vision du programme :

- ***Etude morphologique, anatomique et fonctionnelle des tiges, des feuilles et des racines (relation structure-fonction) et adaptation au milieu.***

- organisation générale de l'axe végétatif (tige, feuille et racine)
- observation d'ectomycorhizes
- coupes de racines (structures primaires et secondaires)
- coupes de tiges (structures primaires et secondaires)
- coupe de limbe de feuille
- anatomie des feuilles de plantes en C4
- adaptation des feuilles et tiges au milieu sec : sclérophytes et malacophyte
- adaptation au milieu aquatique : développement de l'aérenchyme, évolution régressive liée au retour en milieu aquatique
- identification des unités de croissance
- bourgeon (dissection)
- observation de cernes en lien avec la saisonnalité

- ***Adaptation à la fonction de réserve des organes et tissus végétatifs.***

- ***Gestes exigibles au concours :***

- réaliser des coupes à main levée avec coloration au carmino-vert
- reconnaître les structures assurant la fonction de réserve et celle protection (y compris en dégagant des convergences évolutives)
- réaliser une coloration à l'eau iodée afin de mettre en évidence des réserves amylacées.
- utiliser les représentations conventionnelles pour réaliser des schémas d'interprétation des coupes (les codes restant à la disposition des étudiants) ;

- ***Tissus à savoir reconnaître :*** parenchyme chlorophyllien, parenchyme de réserve, xylème, phloème, épiderme, sclérenchyme, collenchyme, endoderme, méristème

- L'étude anatomique est réalisée à partir de coupes à main levée ou de lames du commerce. La détermination de la position systématique et du type d'organe sont hors programme. 1. LE cœur

Le végétal angiosperme : un cormophyte vascularisé (trachéophytes)...c'est-à-dire une plante disposant au moins d'une tige feuillée, et dont l'anatomie révèle l'existence de structures vasculaires ; un euphyllophyte aussi, au sein de la lignée verte.

Les Angiospermes :

- un groupe diversifié : des plantes herbacées / des plantes ligneuses (arbres/ arbustes), des plantes annuelles / des plantes bisannuelles / des plantes vivaces ;
- un groupe subdivisé en taxons plus restreints : Monocotylédones / Dicotylédones, et dans ces deux subdivisions ...des familles disposant d'une unité de caractères autour de l'organisation de leur appareil floral (cf. 1^{ère} année).

1. ORGANISATION FONCTIONNELLE DES AXES VEGETATIFS : ETUDE DES ORGANES AXIAUX JEUNES ET DES FEUILLES

1.1 L'appareil racinaire permet le plus souvent l'ancrage au sol et une absorption hydrominérale depuis la solution du sol

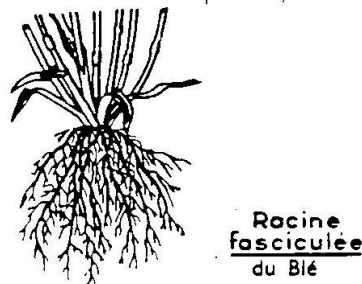
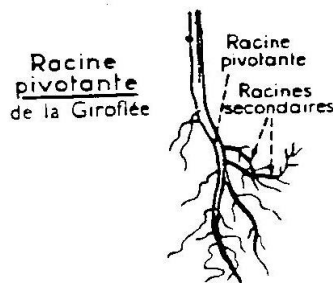
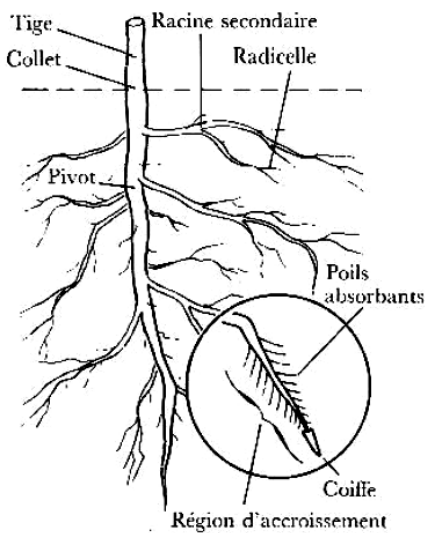
a. morphologie

La racine principale est issue du développement de la radicule embryonnaire.

Le long de cette racine principale, se développe un nombre plus ou moins importantes de racines latérales, qui à leur tour se ramifient aussi...

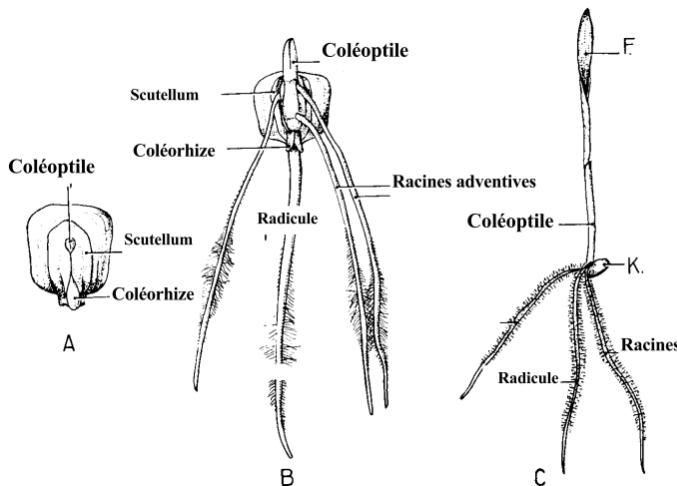
Au final, suivant le développement relatif de la racine principale et des différentes ramifications, on distingue deux grands schémas d'organisation du système racinaire :

- le **système pivotant** (exemples : giroflée, haricot, carotte, etc.)
- le **système racinaire** (exemples : poireau, euphorbe, blé, etc.)

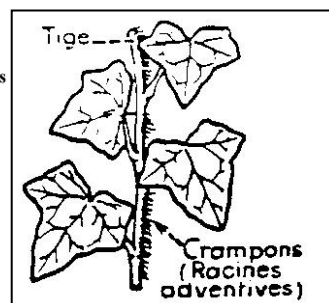


Système racinaire pivotant typique des Dicotylédones

Certaines plantes disposent de racines développées à partir de la tige : ce sont des **racines adventives**. Elles se substituent aux précédentes au cours du développement (cas du Maïs) ou s'y ajoutent (cas des racines aériennes crampons du lierre).



Germination du Maïs et développement des racines adventives

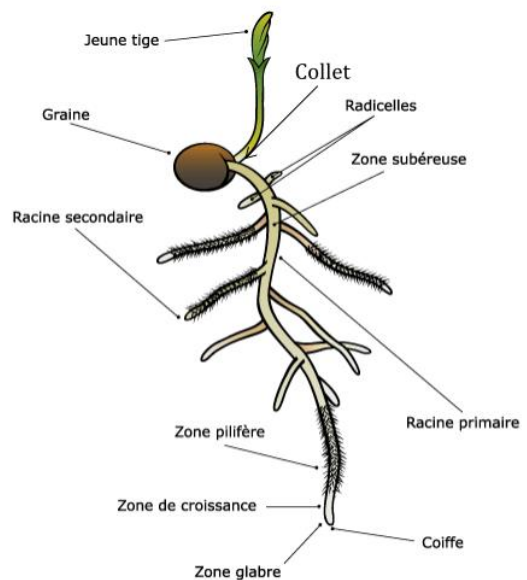


Racines adventives du lierre

L'extrémité des jeunes racines présente une organisation faisant apparaître une zonation longitudinale avec :

- une zone apicale recouverte d'une coiffe,
- une zone de croissance (élongation),
- une zone pilifère,
- une zone subérifiée d'où peuvent commencer à émerger des ramifications.

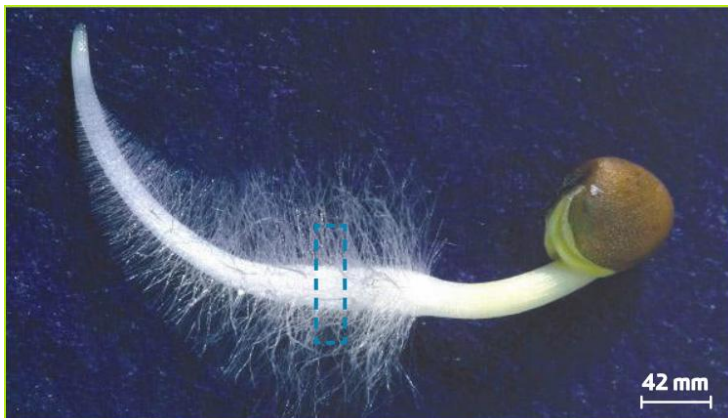
La zone pilifère s'observe le plus souvent chez des plantes dont on a suivi le développement dans des milieux artificiels : gélose, vermiculite par exemple.



Germination de Haricot

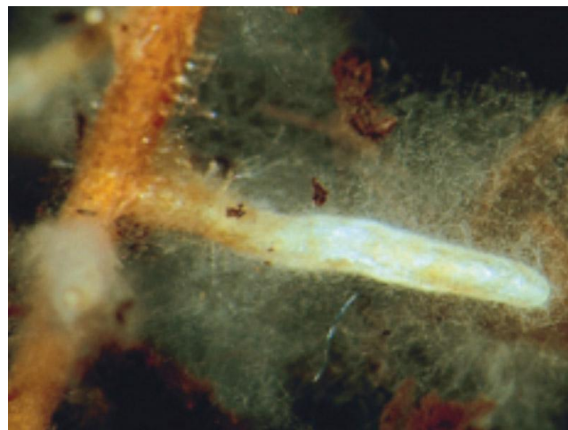
Plus de 90% des angiospermes de nos régions présentent en lieu et place des poils absorbants un feutrage mycélien qui entoure les radicelles. Ce sont des mycorhizes (ou mycorrhizes), véritable association symbiotique entre le végétal chlorophyllien et le champignon. Les filaments mycéliens jouent un rôle semblable aux poils absorbants en absorbant de l'eau et des ions dans le sol et en les drainant vers la périphérie de la racine qui les absorbe à son tour.

L'organisation des mycorhizes sera vue lors du TP consacré aux champignons.

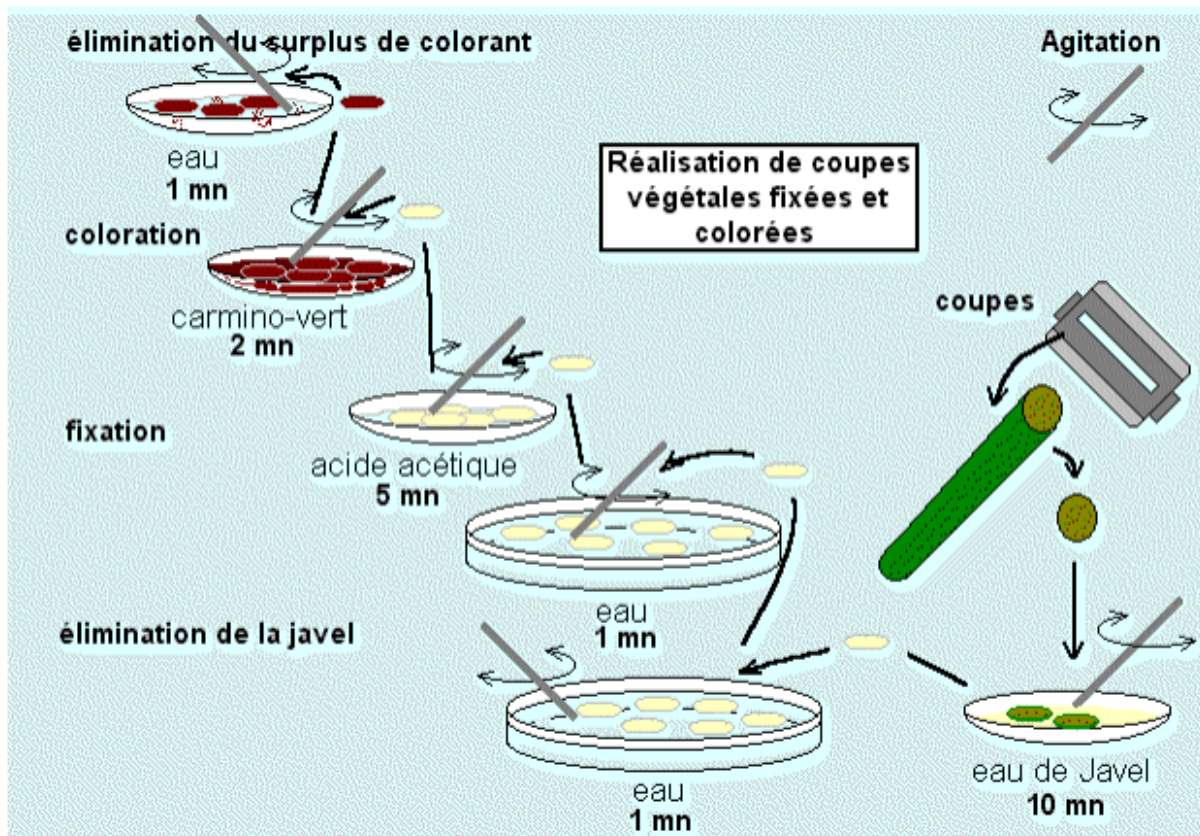
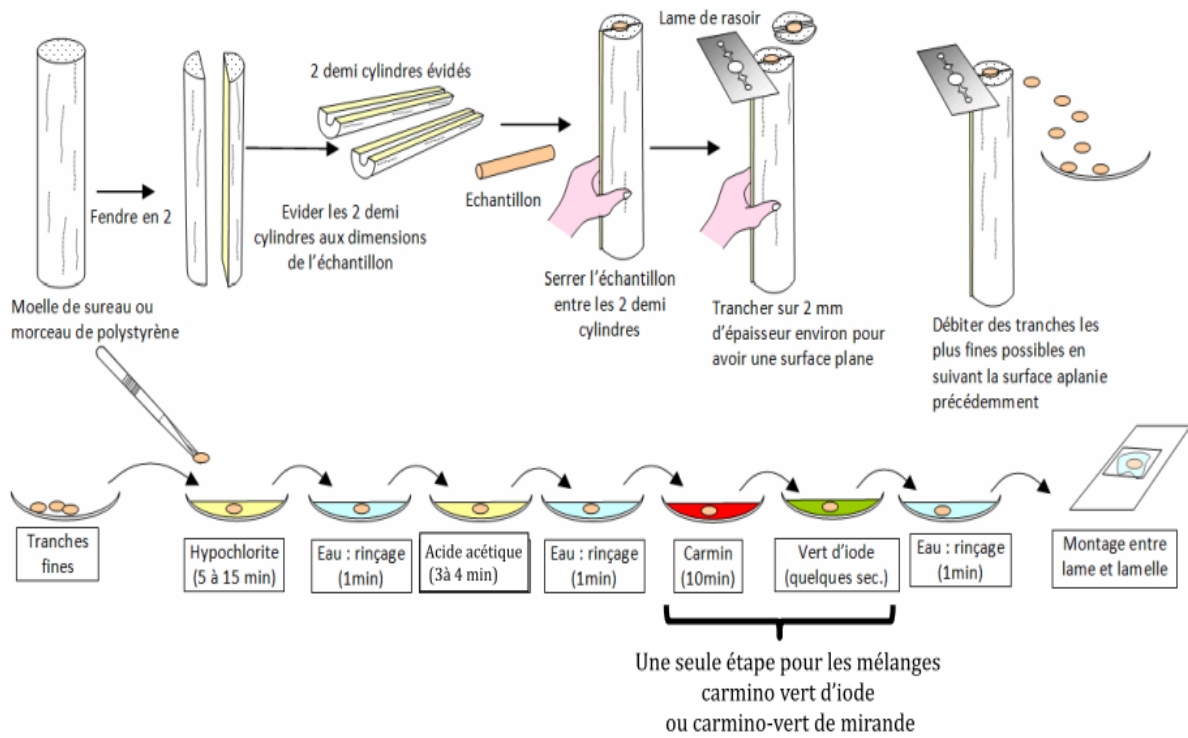


Poils absorbants sur racine

Racine mycorhizée



Remarque : les racines peuvent aussi prendre en charge une autre fonction, la mise en réserve. Ce point sera abordé dans la partie 3 consacrée aux adaptations.

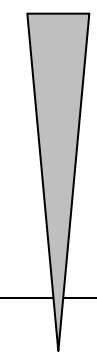


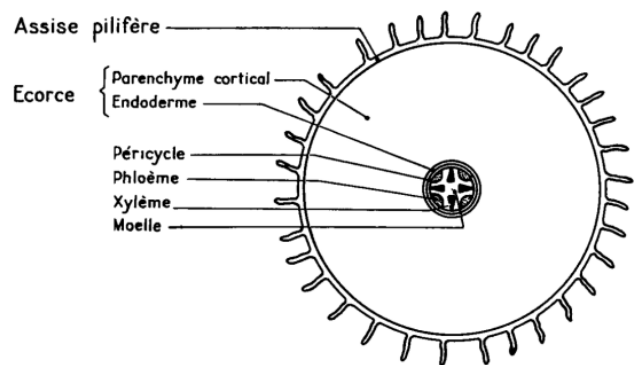
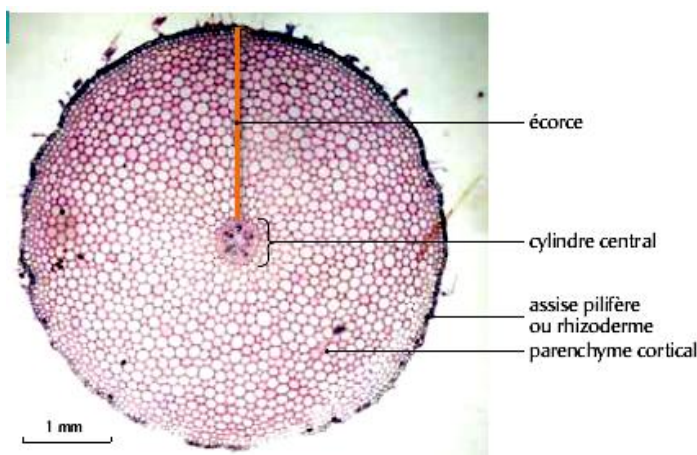
1.2 Anatomie racinaire : structure primaire des racines

L'étude anatomique est menée en observant la structure de coupes transversales de racines. Nous nous limiterons dans cette partie aux racines jeunes, c'est-à-dire situées le plus souvent dans le secteur pilifère ou le secteur subérifié des jeunes racines.

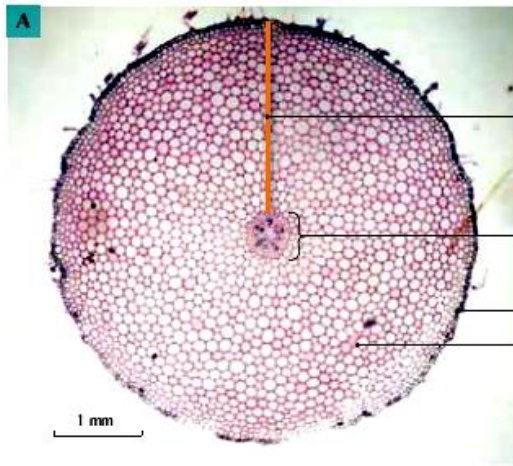
L'observation montre l'organisation concentrique de la racine en plusieurs couches tissulaires. Les cellules de ces tissus dérivent des cellules produites par la zone méristématique située dans l'apex (Cours sur la croissance). Pour cette raison, on parle de tissus primaires dont la disposition dessine la structure primaire de la racine.

Non mycorhizée, une jeune racine montre une structure à symétrie axiale, avec de l'extérieur vers l'intérieur :

| Tissu | Fonction majeure | |
|---|---|---|
| Epiderme pilifère ou une/ qqs assises subéreuse | Absorption racinaire ANCRAGE | <div style="text-align: center;"> extérieur  intérieur </div> |
| Parenchyme cortical | Absorption, Conduction radiale via plasmodesmes (symplasme) et paroi (apoplasme) | |
| Endoderme | Sélectivité à conduction radiale Passage obligé par le symplasme | |
| Péricycle (parenchyme) | Conduction symplasmique | Cylindre central |
| Phloème I et xylème I | Conduction verticale des sèves | |
| Moelle (parenchyme) | | |



CT de racine de Dicotylédone à structure primaire (Renoncule ou Ficaire)



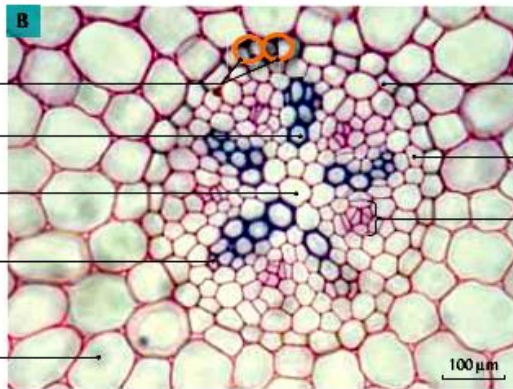
écorce

cylindre central

assise pilifère
ou rhizoderme

parenchyme cortical

1 mm



épaissement
ou cadre de Caspary

métaxylème

parenchyme
médullaire

pôle ligneux
ou protoxylème

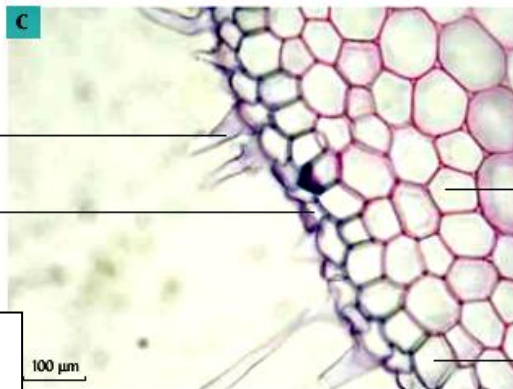
parenchyme
cortical

endoderme

péricycle

phloème I

100 µm



poil absorbant

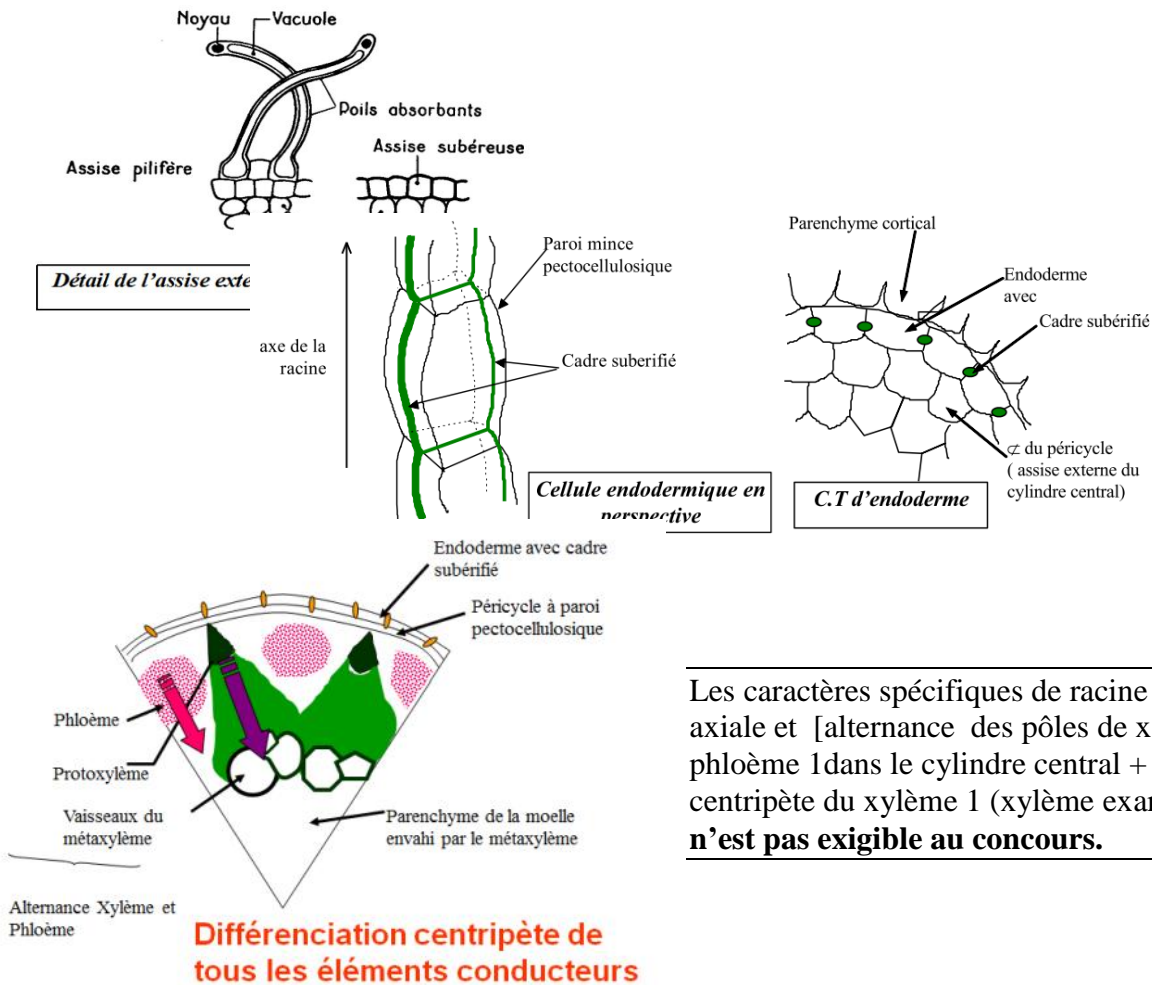
assise pilifère
ou rhizoderme

parenchyme cortical

assise subéreuse
en cours d'édification

100 µm

Coupe de Ficaire

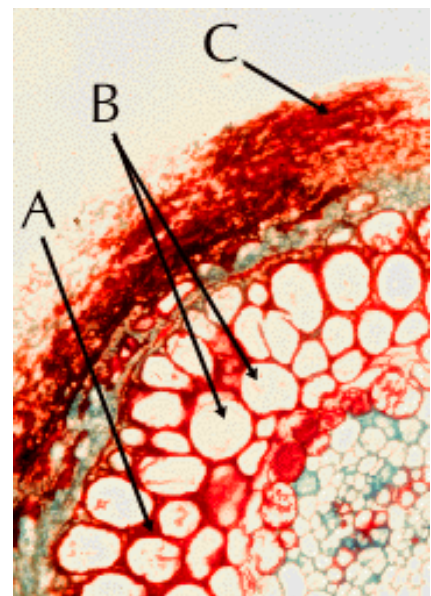


Avec mycorhize ectotrophe, la zone pilifère est souvent absente et remplacée par un manchon mycélien formant le réseau de Hartig.

Les ectomycorhizes sont formées sur les racines de certains arbres: Les hyphes entourent la racine et forment une structure spéciale, le manteau. Ils pénètrent plus ou moins profondément la racine (réseau de Hartig) mais jamais les cellules:



Racines mycorhizées

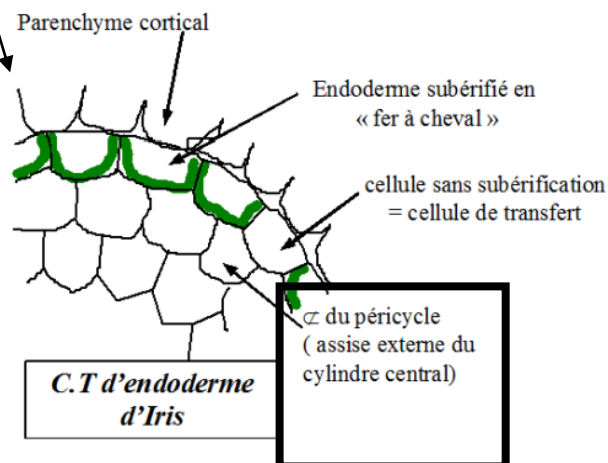
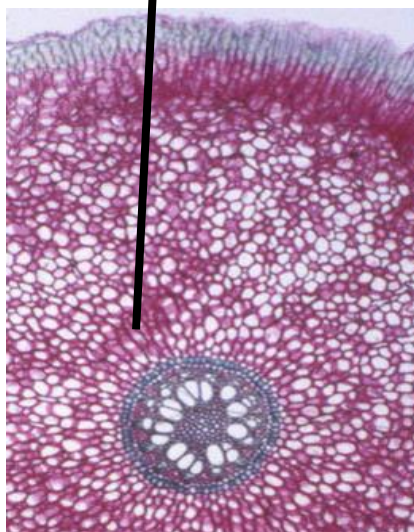
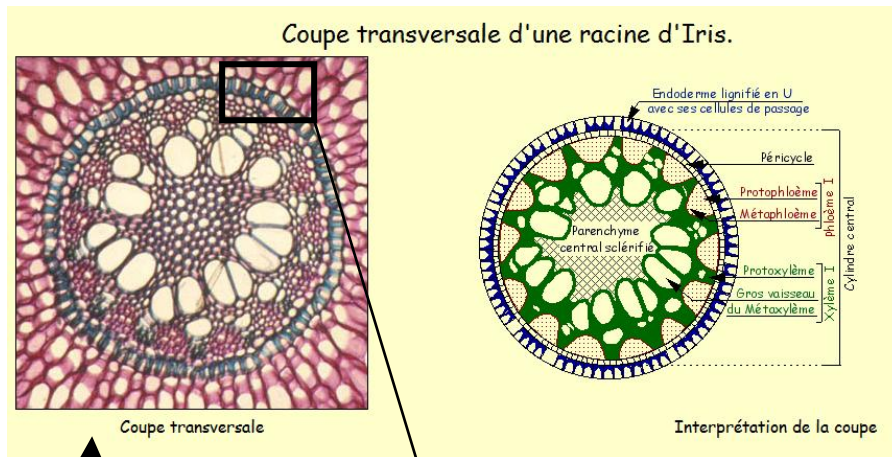


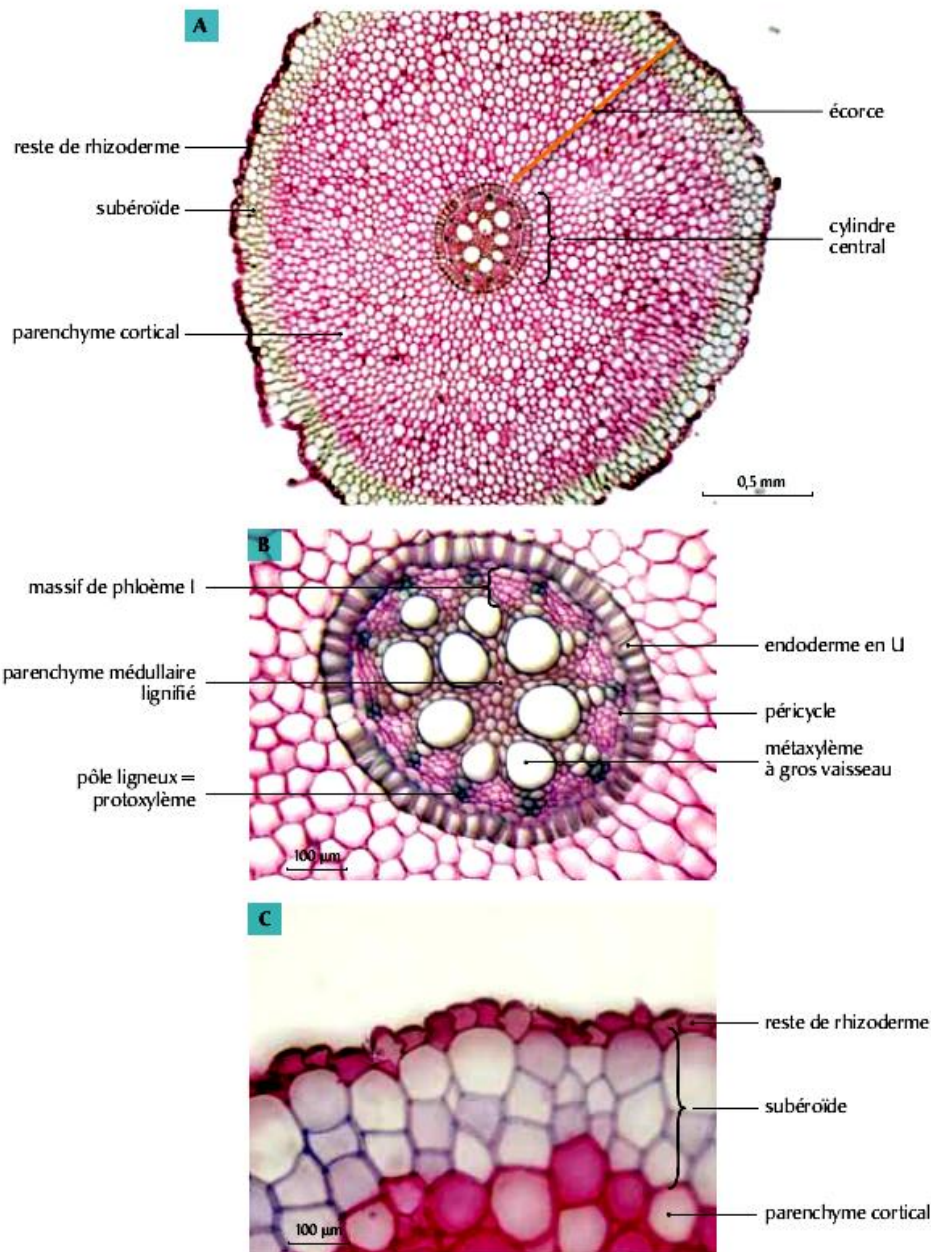
Les hyphes du champignon (en rouge A) entourent les cellules de la racine (B) pour former le réseau de Hartig et entourent la racine pour former le manteau (C)

Le **caractère souterrain** de l'organe est associé à la **présence de l'endoderme** et d'un **cylindre central réduit par rapport à l'écorce**, l'**absence de stomates dans l'épiderme**, et l'**absence de tissus de soutien** (caractère non spécifique cependant car partagé par les tiges des plantes aquatiques).

La présence de poils absorbants ou du réseau de Hartig renvoie à l'observation d'une coupe dans le secteur pilifère (ou équivalent mycorhizé), c'est-à-dire juste dans un secteur de racine jeune dont les cellules ne s'allongent plus.

La présence d'assise(s) subéreuse(s) indique une coupe dans un secteur un peu plus âgé encore, et situé un peu plus loin donc de l'apex.





Bilan :

Ramification et pilosité (ou mycorhize) assurent l'extension de la surface de contact au sol → ancrage + absorption.

Tissus de protection dans les secteurs non absorbants → **protection mécanique** (tout en permettant échanges gazeux)

Parenchyme cortical + endoderme → Structure favorable au transit radial de l'eau et des ions **avec une barrière de sélectivité** membranaire obligatoire (précoce si transit cortical symplasmique, endodermique si transit cortical apoplasmique)

...et à une possibilité de mise en réserve

Tissus conducteurs :

→ **xylème** permettant d'acheminer **sève brute (hydrominérale)** vers secteurs non absorbants (zone de croissance de la racine + tige feuillée)

→ **phloème** permettant d'**approvisionner la racine en assimilats organiques** (activité métabolique liée à absorption, croissance, et éventuellement mise en réserve).

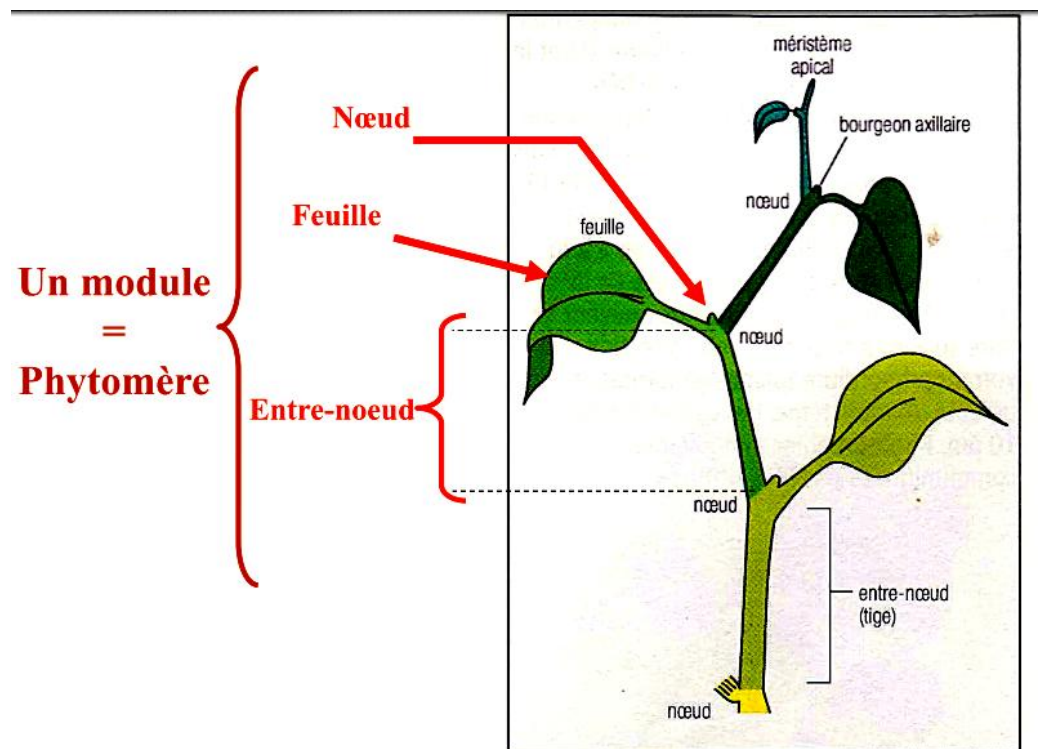
1.2 L'appareil caulinaire permet l'assimilation photosynthétique et porte l'appareil reproducteur

a. morphologie des tiges feuillées

Il s'agit le plus souvent d'axes dressés qui portent le feuillage à la lumière

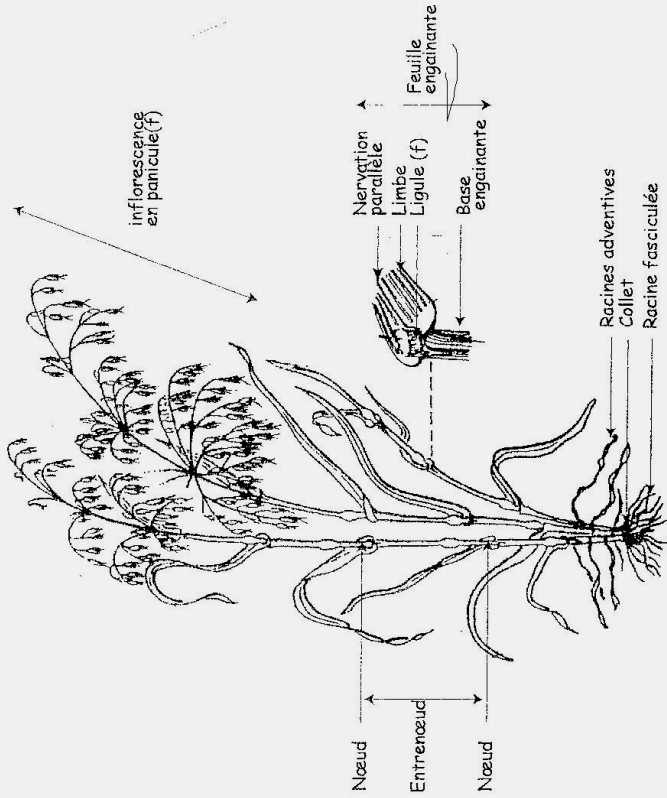
L'examen d'une tige de dicotylédone telle que la luzerne montre :

- une tige ramifiée dont les axes se terminent par bourgeons
- une succession de nœuds, d'entre-nœuds avec départ régulier de feuilles le long de la tige : une organisation en phytomères
- des feuilles pétiolées à limbes composés de folioles, à nervation non parallèle et présentant à la base de leur pétiole éventuellement des stipules
- à l'aisselle des feuilles un bourgeon axillaire visible ou potentiel...

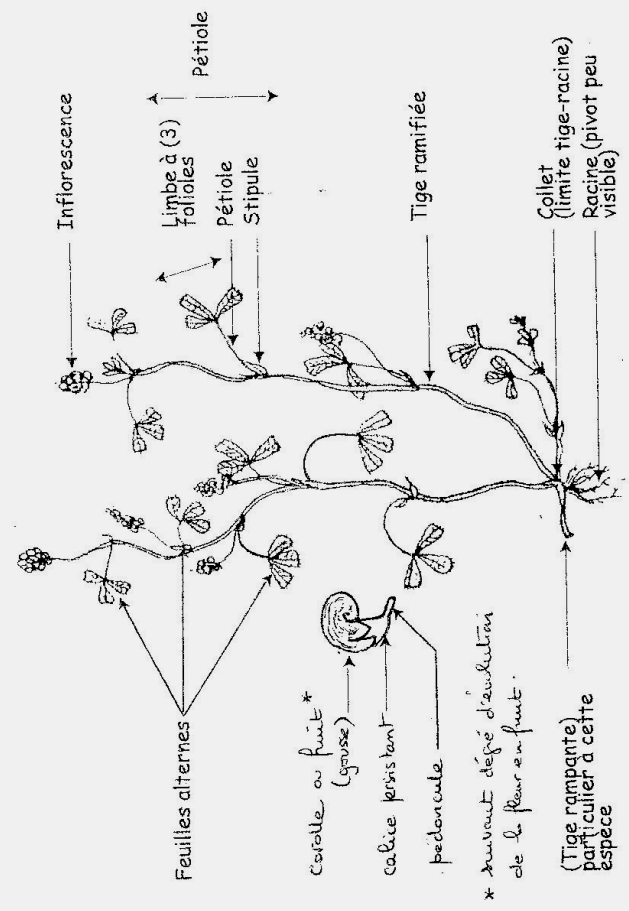


L'examen d'une tige d'une poacée (monocotylédone) montre quant à elle :

- une tige non ramifiée constituée de nœuds et d'entre-nœuds masquée par le caractère engainant des feuilles, terminée par un bourgeon
- des feuilles sessiles réduites aux limbes à nervation parallèle, pouvant présenter à l'endroit où elle se dégage de la tige une ligule.

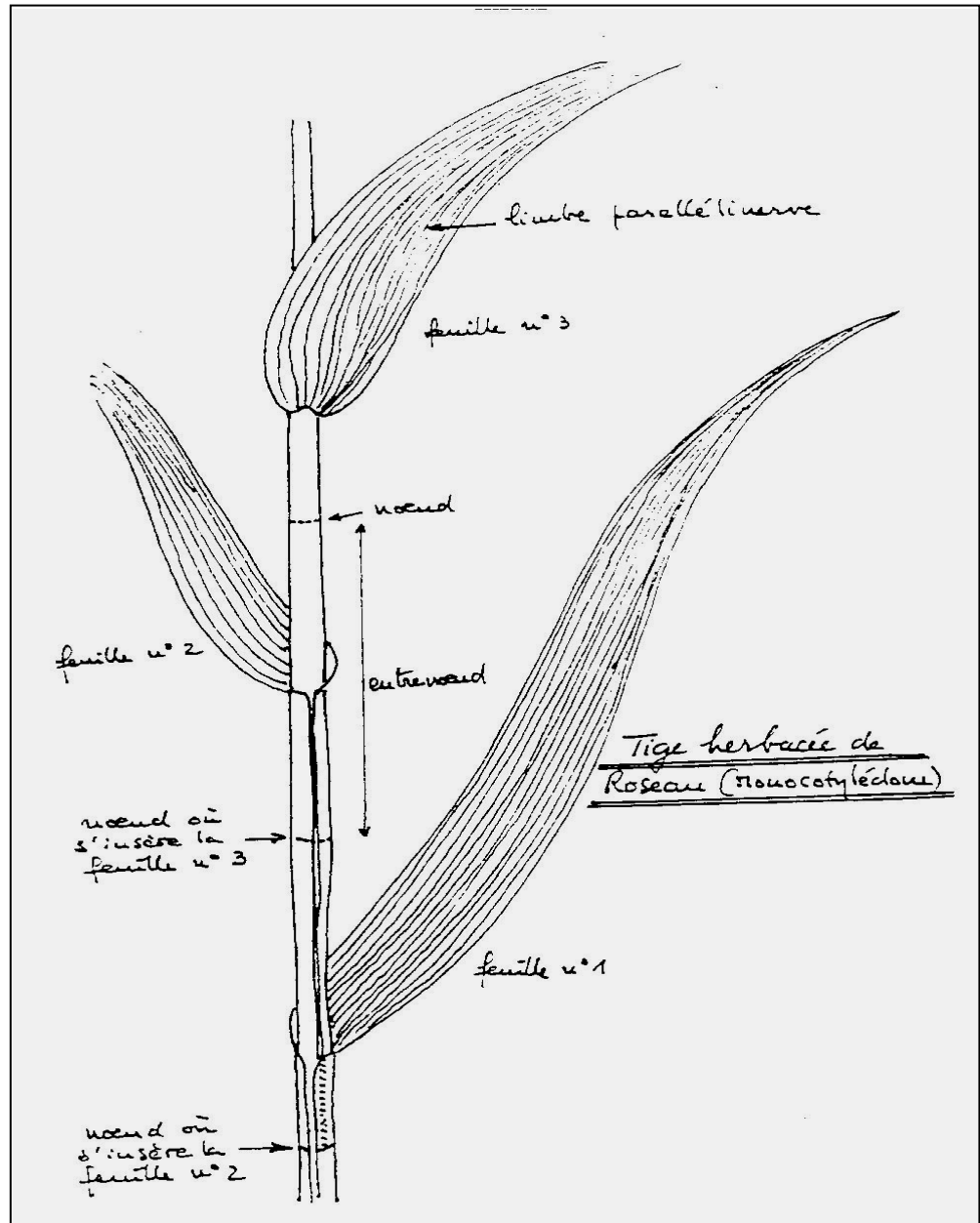


Avena elatior = Avoine élevée
un exemple de Poacée prairiale



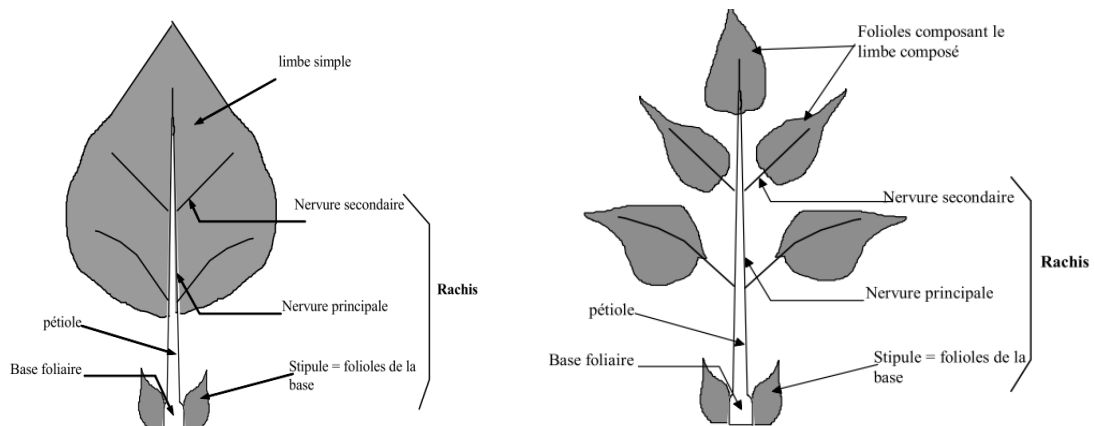
Medicago lupulina : Luzerne lupuline
un exemple de Fabacée prairiale

Ces deux exemples illustrent l'extraordinaire diversité morphologique que peuvent présenter des tiges feuillées au stade herbacé.



Les variantes sont ainsi très nombreuses ; chez les seules dicotylédones, elles portent :

- sur le développement de la tige : plante en rosette à entrenoeuds non développés
- sur la disposition des feuilles le long de la tige : phyllotaxie opposée décussée / alterne / verticillée
- sur l'organisation du limbe foliaire
- sur la nervation foliaire
- sur la présence ou l'absence de pétiole (feuille sessile)



Au-delà de ces différences :

- l'aplatissement des feuilles fait de ces organes de formidables surfaces d'échanges gazeux et hydrique (problème sur lequel il faudra revenir...) étendues dans l'atmosphère, ainsi que de formidables surfaces de captation d'énergie lumineuse.
- la phyllotaxie en disposant relativement les phytomères les uns par rapport aux autres optimise a priori cette captation

b. anatomie - structure primaire des tiges

L'observation de coupes d'entre-nœuds montre l'organisation concentrique de la tige en plusieurs couches tissulaires. Les cellules de ces tissus dérivent des cellules produites par la zone méristématique située dans l'apex (Cours sur la croissance). Pour cette raison, et comme dans la racine, on parle de tissus primaires dont la disposition dessine la structure primaire de la tige. Leurs principales fonctions sont :

| Tissus | | |
|---|--|--|
| Epiderme stomatifère et +/- recouvert d'une fine cuticule | Protection (notamment vis-à-vis déshydratation potentielle) Transparence Mais permettant de canaliser des flux modulables de gaz (stomates) | |
| Parenchyme cortical | Fonction métabolique : photosynthèse sur tiges herbacées jeunes | |
| Collenchyme Sclérenchyme | Soutien / caractère non porteur du milieu aérien Collenchyme → organes jeunes disposant encore de potentiel de croissance (soutien dépendant du couple hydrosquelette / paroi → dépendant de l'eau pour turgescence) Sclérenchyme → organes ayant achevé leur croissance (tissu « mort », économie en eau/ fonction soutien) | |
| Phloème I et xylème I superposés et organisés en faisceaux cribro-vasculaires (FCV) | Conduction des sèves au travers de la plante entre racines et feuilles, entre racines /feuilles et zones de croissance...entre organes végétatifs et organes reproducteurs (fleurs, fruits) | |
| Parenchyme médullaire | Possibilité de mise en réserve / disparition au profit d'une « lacune » | |

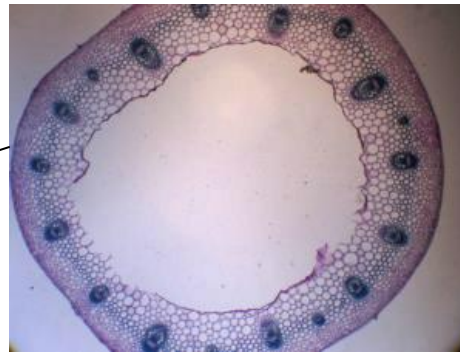
Les caractères spécifiques de tige sont : symétrie axiale et [superposition des pôles de xylème I et de phloème I + différenciation centrifuge du xylème I (xylème endarche)]...**ceci ne relevant pas des connaissances exigibles.**

Paquet (xylème I superposé au phloème I) = faisceau cribro-vasculaire (FCV, appelé encore faisceau criblo-vasculaire)

Le **caractère aérien** de l'organe est associé à la présence de tissus de soutien corticaux abondant relativement à l'épaisseur de l'écorce, avec épiderme stomatifère quand la tige est encore assez jeune mais qui peut être remplacé par des cellules subérifiées quand la tige est un peu plus âgée (c'est-à-dire aussi quand on se situe à la base de celle-ci, suffisamment loin de l'apex caulinaire).

Remarque : il existe aussi des tiges souterraines : elles conservent els caractères spécifiques de tige mais on y trouve une proportion cortex/cylindre central inversé et souvent une à quelques assises endodermiques ; le parenchyme cortical est pauvre en tissus de soutien et ses cellules parenchymateuses sont propices à la mise en réserve.

Vue d'ensemble



DETAILS

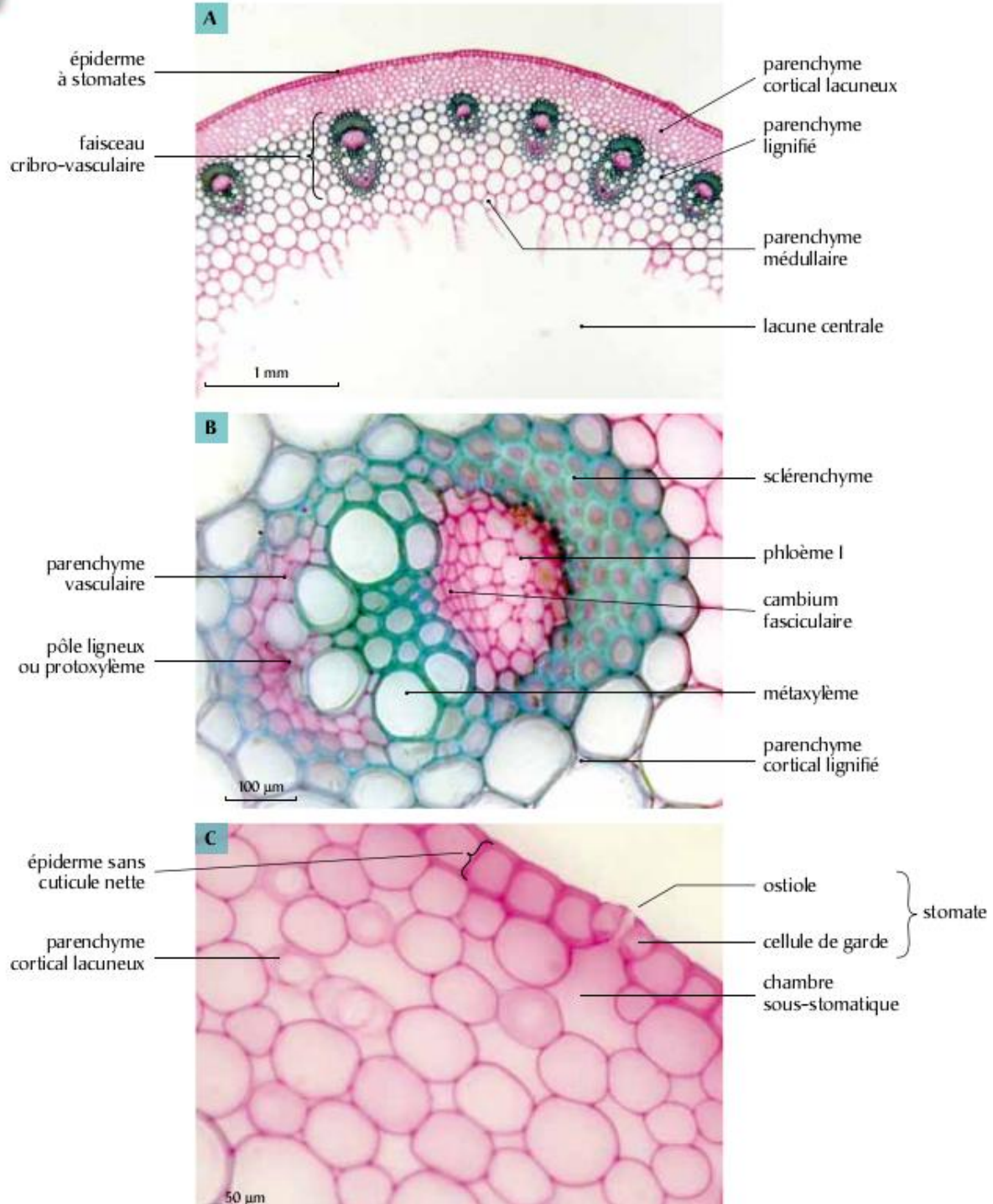
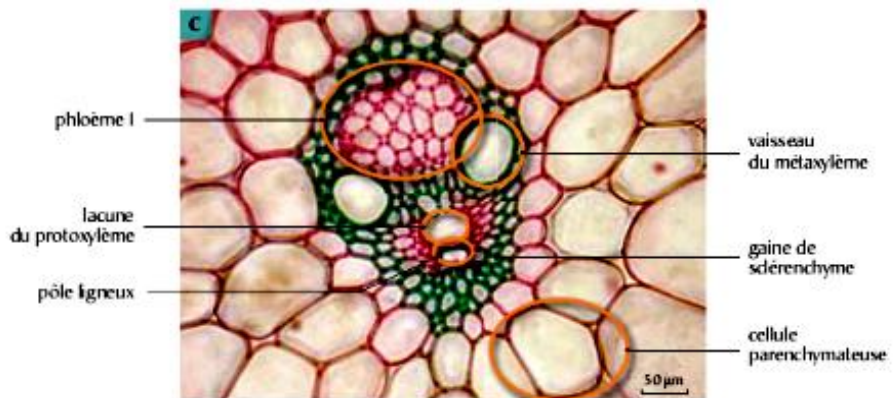
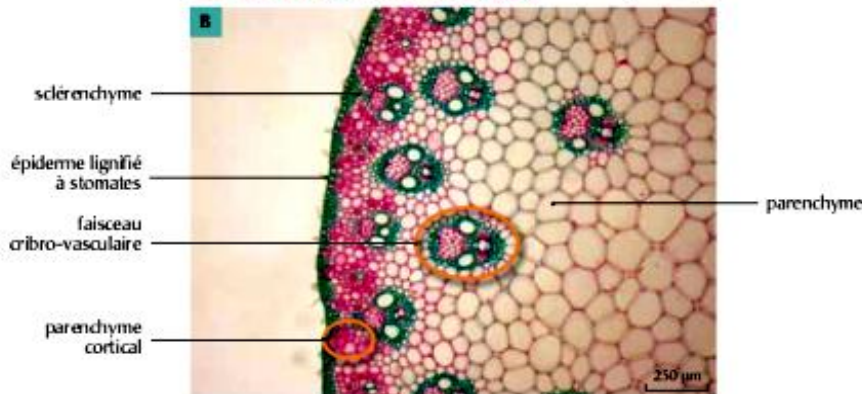
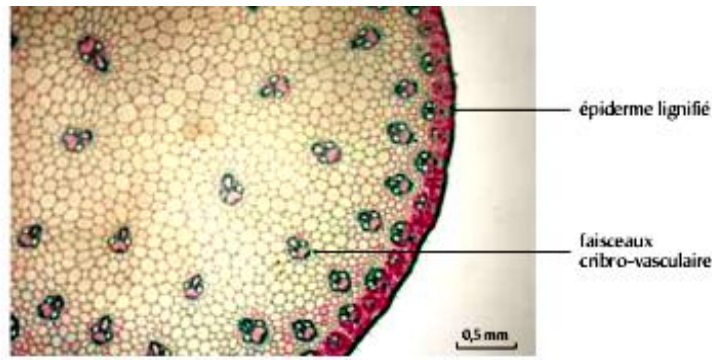


Planche Tige Renoncule : structure primaire dicotylédone

Planche Tige de Maïs (monocotylédone)



Détail d'un faisceau cribro-vasculaire en entouré d'un anneau de sclérenchyme. Pas de cellules cambiales ici entre phloème I et xylème I.

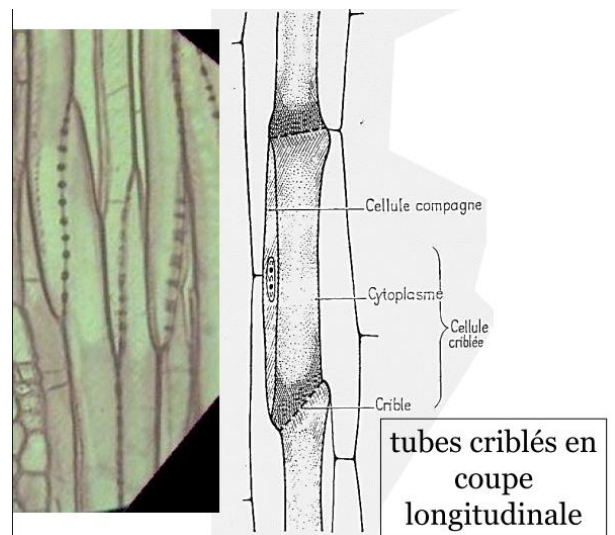
Des tissus à savoir reconnaître et dont il faut connaître les propriétés essentielles :

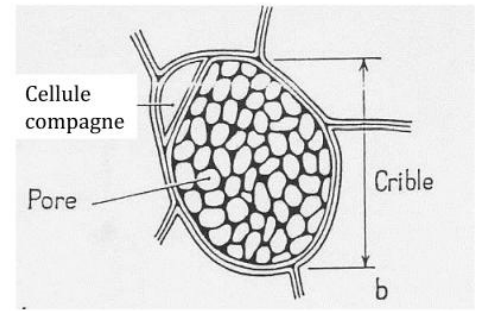
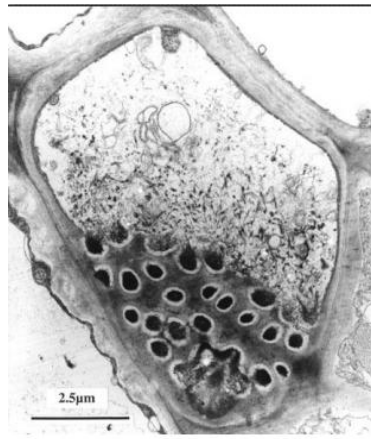
Des tissus conducteurs :

Le phloème primaire

Le phloème est constitué de cellules allongées parallèlement à l'axe de l'organe : des **tubes criblés** et des **cellules compagnes**.

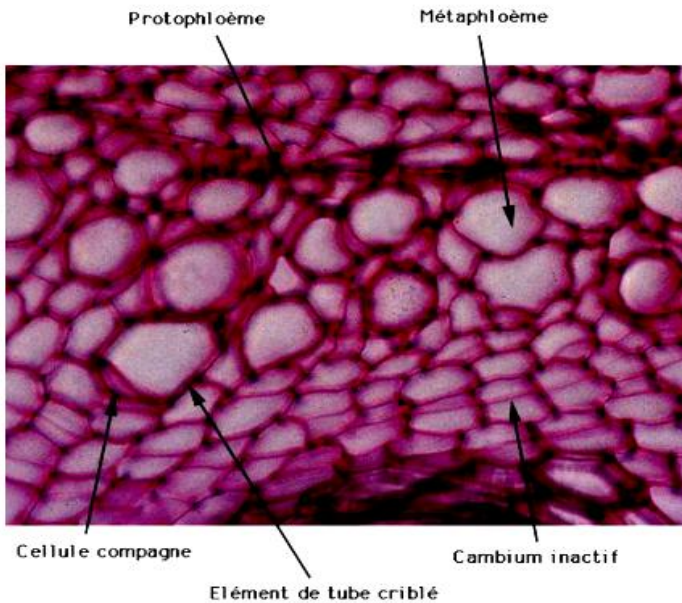
Un tube criblé est une cellule allongée, aux parois cellululosiques, qui est remplie d'un cytoplasme dont les organites ont disparu en fin de différenciation. Les parois transversales qui les délimitent sont percées de nombreux pores pariétaux qui définissent des **plages criblées**. Chaque tube communique via des plasmodesmes avec une petite cellule qui la jouxte latéralement, c'est une cellule compagne. Elle dispose de tous les organites et de la machinerie métabolique capable d'assurer le turn-over moléculaire des deux cellules associées en système symplasmique.





Crible simple

Observation de cribles sur une CT de phloème (tige de Bryone)



Observation du Phloème de tige de Bryone

Le xylème primaire

Il est constitué de cellules également allongées axialement. Ces cellules ont subi une différenciation durant laquelle leur paroi s'est incrustée de lignine (hydrophobe et sclérifiante) et au terme de laquelle leur contenu cellulaire a disparu.

Leur cloison transversales sont percées de nombreuses ponctuations, ponctuations que l'on retrouve aussi sur leurs faces latérales et qui permettent la distribution des constituants de la sève brute aux cellules qui les jouxtent...

Ce sont donc des structures adaptées à la conduction et à la distribution de la sève brute.

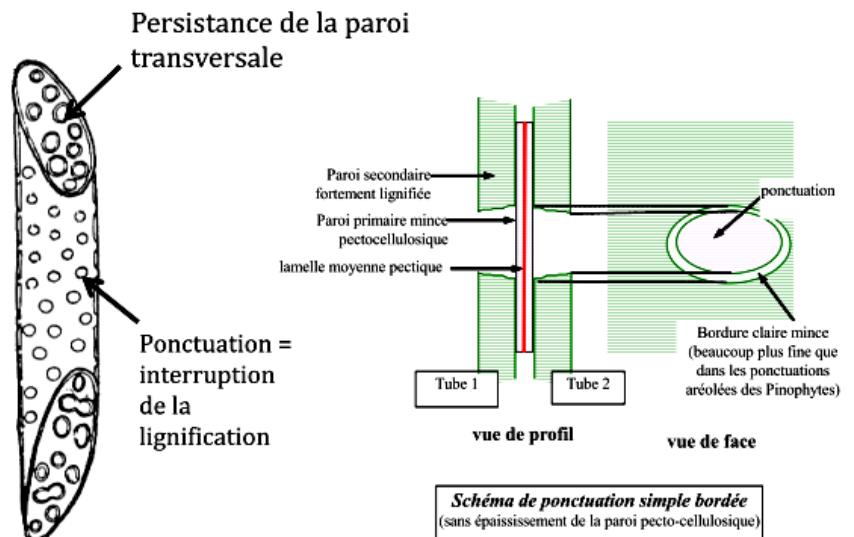
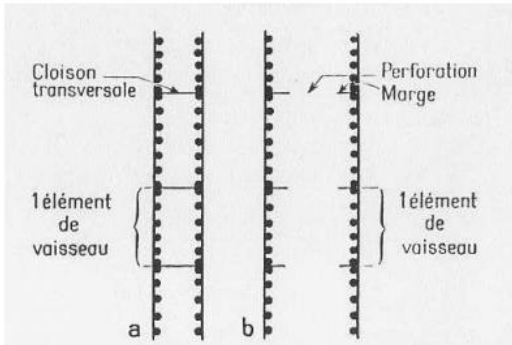


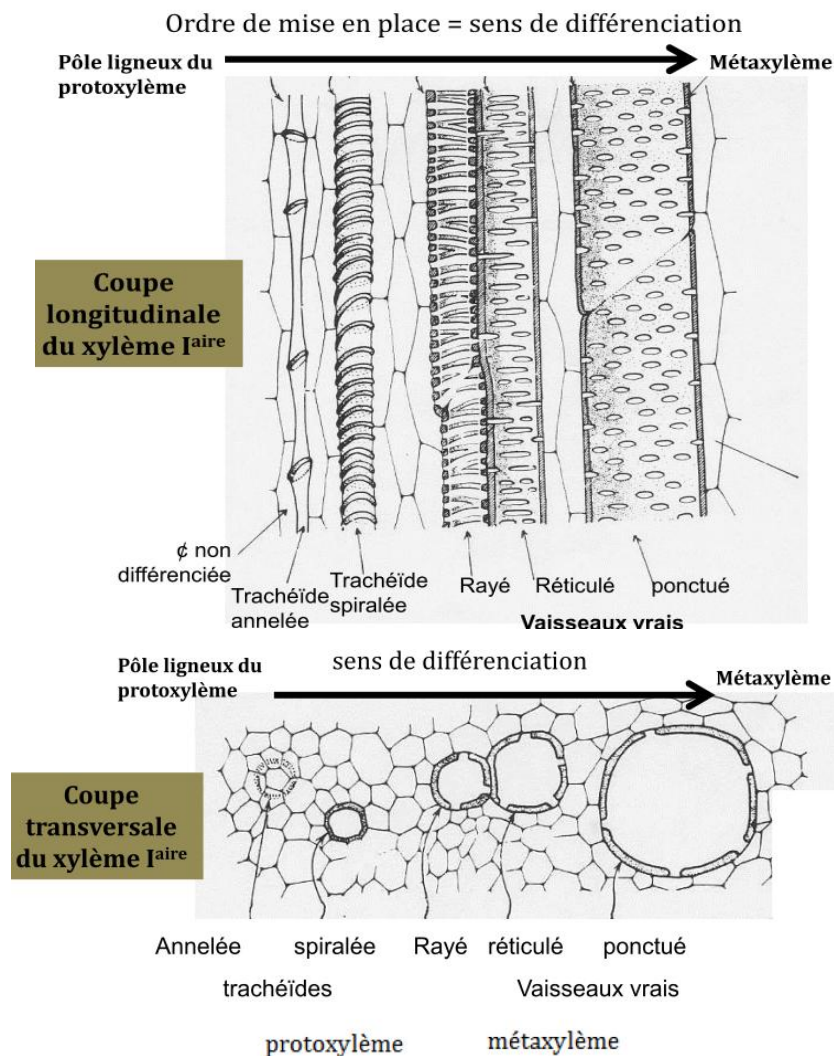
Schéma de trachéide ponctuée

Le **protoxylème** des pôles vasculaires est constitué de **vaisseaux imparfaits** (ou trachéïdes). Ce sont des vaisseaux constitués de la succession de cellules dont ont été conservées les parois transversales). Il est **souvent déformé et devenu non fonctionnel** du fait de la croissance qui a suivi sa mise en place.

Le **métaxylème** est constitué de **vaisseaux vrais** constitué de l'enchaînement longitudinal de cellules de plus gros diamètre que les trachéïdes et dont la plupart des cloisons transversales ont totalement disparu en formant de véritables **perforations**. Ils sont aussi ponctués latéralement. Par sa lignification, le xylème primaire contribue aussi au soutien.



Chez les Angiospermes: des trachéïdes aux vaisseaux vrais



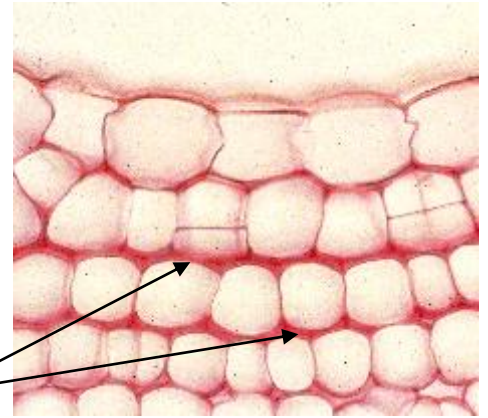
Le xylème contient aussi des cellules vivantes –parenchyme xylémien- impliquées dans des fonctions d'échanges internes et éventuellement de mise en réserve (cf. cours), ainsi que des cellules spécialisées dans le soutien –fibres- mais peu représentées dans le xylème I.

Le collenchyme :

Tissu dérivant de parenchyme cortical dont les cellules ont subi un épaississement pariétal primaire. Purement cellulosique, ses parois demeurent souples et il ne constitue un tissu de soutien que si l'état de turgescence de ses cellules est suffisant.

On le trouve principalement dans les organes aériens jeunes, qui n'ont le plus souvent pas épuisé leur potentiel de croissance.

Exemple : collenchyme tangentiel

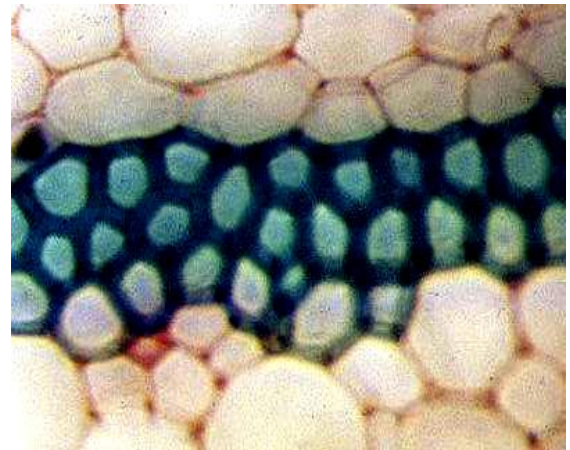


épaississements
cellulosiques

Le sclérenchyme :

Tissu dérivant de parenchyme cortical dont les cellules ont subi un épaississement pariétal cellulosique et une lignification. Les parois sont donc plus ou moins sclérifiées. Leur imperméabilisation s'est aussi accompagnée de la mort des cellules.

On le trouve principalement dans les organes aériens qui ont achevé leur croissance. Il permet un soutien sans nécessité d'état de turgescence, donc sans besoin d'eau.

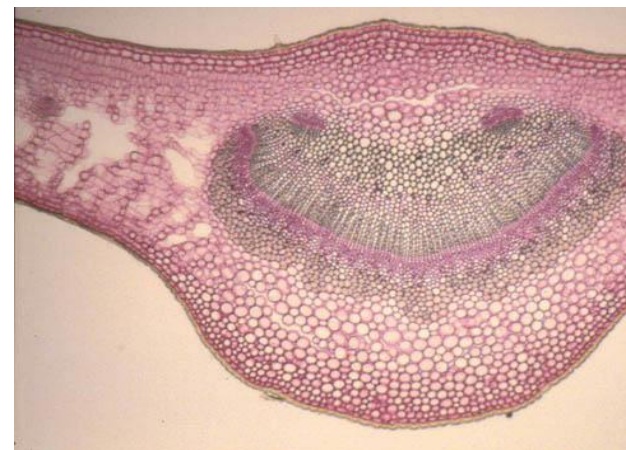
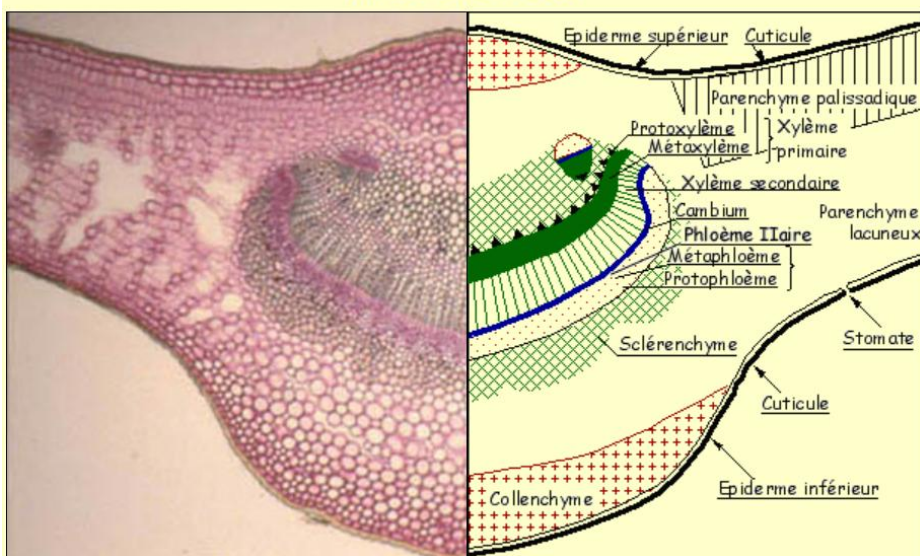


c. anatomie - structure des feuilles

L'observation de coupes transversales de limbes foliaires montre la symétrie bilatérale de l'anatomie foliaire doublée d'une polarité dorso-ventrale (abaxiale – adaxiale, ou inférieur – supérieur).

L'anatomie du limbe s'organise en un ensemble de couches parcourues longitudinalement par des nervures riches en tissus conducteurs et tissus de soutien.

Coupe transversale de la nervure principale d'un
limbe de Houx



| Tissus couches | | Tissus axes | Fonction majeure | | |
|--|--|---|---|-----|--|
| Epiderme supérieur souvent recouvert d'une cuticule +/- épaisse (adaxial, ventral) | | peu stomatifère | Protection mécanique, hydrique, tout en étant transparent Echanges gazeux modulables | | |
| Parenchyme palissadique | M E S O P H Y L L E | <i>Collenchyme</i> | Assimilation Photosynthétique | | <i>Soutien</i> |
| | | <i>Xylème I à diff. ventro-dorsale superposé à...</i> | | | <i>Apport de sève brute</i> |
| | | <i>Phloème I</i> | | | <i>Départ sève élaborée riche en photoassimilats</i> |
| Parenchyme lacuneux | | <i>Scélerenchyme</i> | | | <i>Soutien</i> |
| | | <i>Collenchyme</i> | Circulation des gaz | | <i>Soutien</i> |
| Epiderme inférieur bcp plus recouvert d'une cuticule souvent bcp moins épaisse (abaxial, dorsal) | | bcp plus stomatifère | Protection mécanique, Echanges gazeux modulables Protection /déshydratation. | INF | |

Le **mésophylle peut être homogène** (maïs, muguet) ou **hétérogène** (houx) ; pour ce dernier, on distingue alors parenchyme palissadique et parenchyme lacuneux.

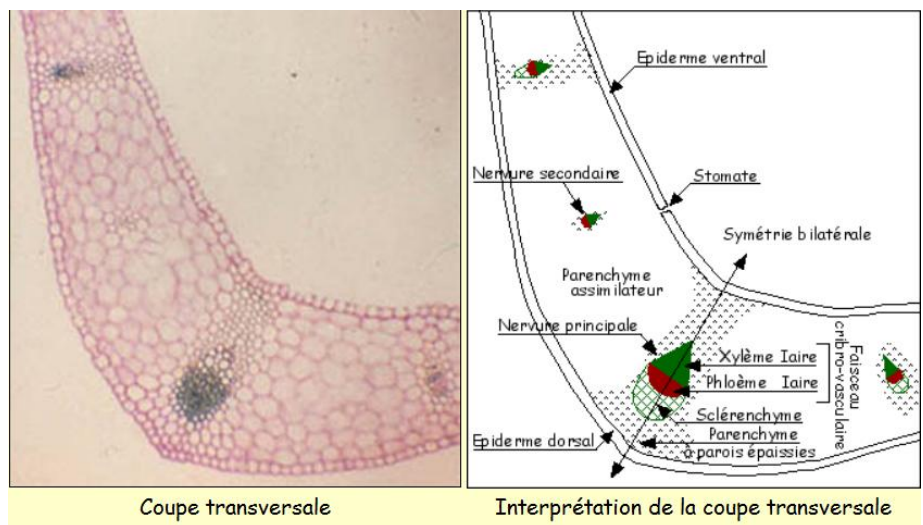
Les caractères spécifiques de la feuille sont sa symétrie bilatérale et son parenchyme chlorophyllien.

Les feuilles aériennes ont un épiderme stomatifère et contiennent des tissus de soutien.

Remarque : il existe aussi des feuilles aquatiques chez certaines plantes qui le sont. Elles peuvent avoir des formes différentes des feuilles aériennes mais possèdent toujours une anatomie distincte avec notamment absence de stomates.

Chez les monocotylédones, l'épiderme de la face adaxiale peut présenter des grosses cellules à turgescence modulable et appelées « cellules bulliformes » ; les variations de leur turgescence permettent quelques mouvements du limbe foliaire permettant notamment de limiter son insolation en cas de stress hydrique.

Schéma de la coupe transversale d'un limbe de muguet (à mésophylle homogène)

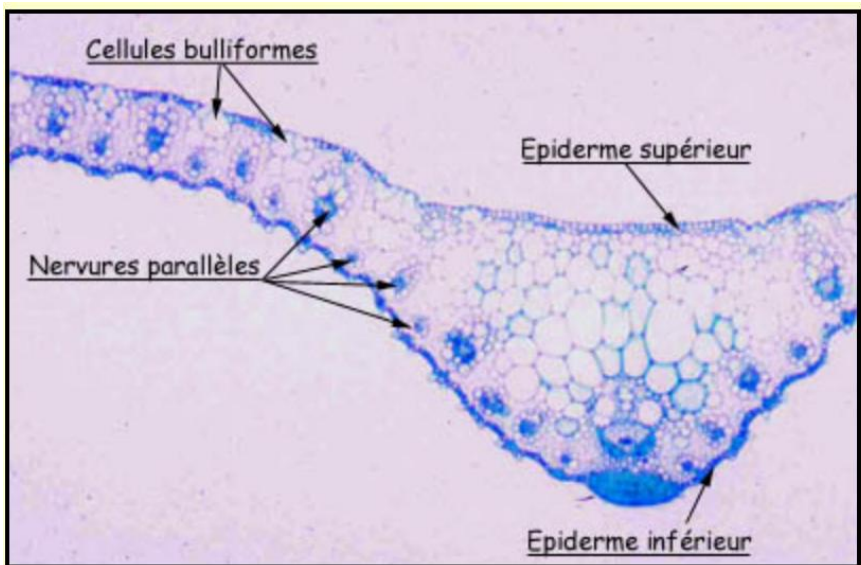


Coupe transversale

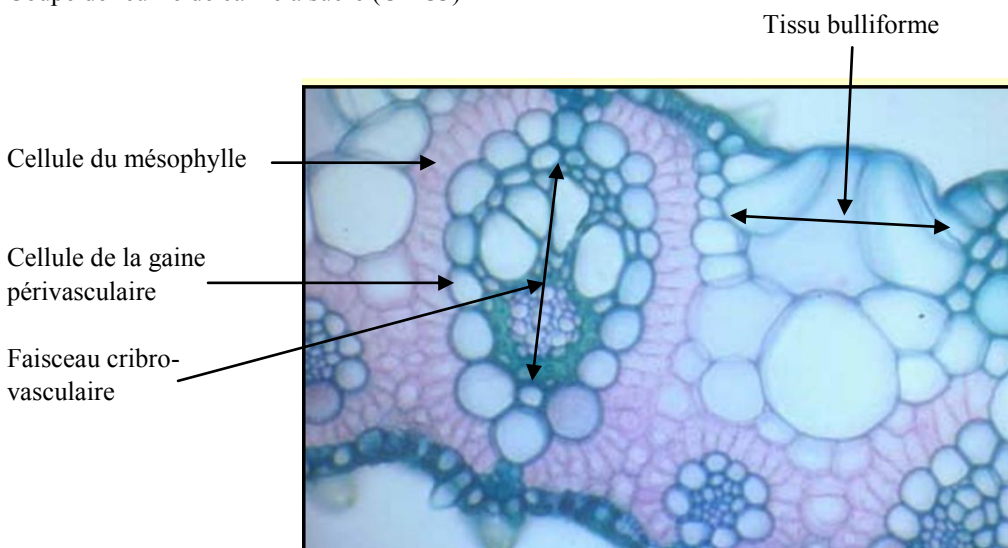
Interprétation de la coupe transversale

Chez certaines plantes (poacées de régions tropicales), les nervures latérales des limbes foliaires peuvent être entourées de cellules de grande taille à paroi cellulosique qui forme une gaine périvasculaire autour de chacune d'elles.

Cette anatomie particulière est à mettre en relation avec un déroulement photosynthétique particulier : une photosynthèse en C4-C3. C'est notamment le cas chez le maïs ou la canne à sucre.



Coupe de feuille de canne à sucre (C4-C3)



Bilan : Des tissus de protection (épiderme avec cuticule) mais TRANSPARENT à la lumière qui délimitent l'organisme en permettant cependant échanges gazeux et hydrique modulables.

La cuticule peut limiter la perte transépidermique liée à l'évaporation et à la vie en milieu aérien.

Transpiration stomatique : **un des moteurs de la circulation de sève brute**

Tissus parenchymateux sous l'épiderme transparent → **fonction assimilatrice photosynthétique foliaire.**

Tissus de soutien : collenchyme, sclérenchyme → port étalé en milieu non porteur

Tissu dynamique : tissu bulliforme modulant l'étalement en fonction du degré de stress hydrique des tissus foliaires.

Tissus conducteurs :

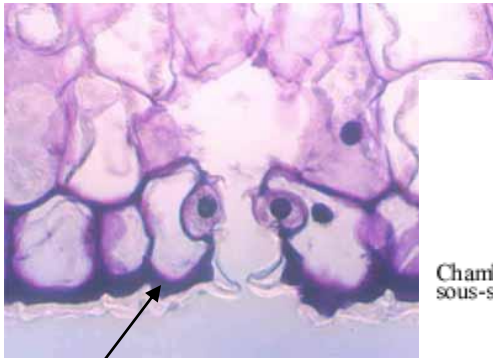
- phloème 1: export des assimilats depuis feuilles assimilatrices –organes sources- vers les autres organes + eau et ions redistribués en accompagnement
- xylème 1 : import sève brute (hydrominérale) depuis racine

Des tissus à savoir reconnaître et dont il faut connaître les propriétés essentielles :

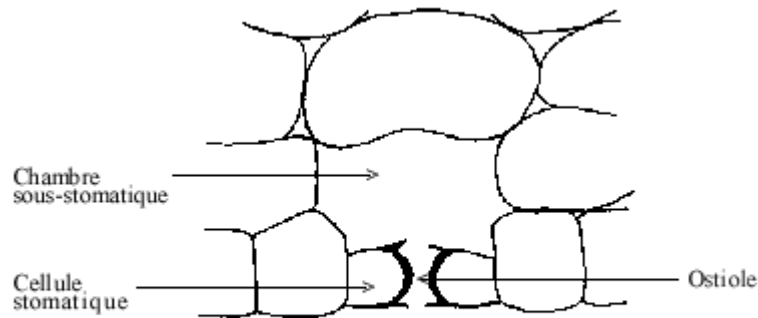
Des tissus de revêtement :

Epiderme stomatifère : cellules jointives avec différenciation de stomates (cf. cours).

Epiderme recouvert de cuticule : cellule recouverte sur leur face externe d'une paroi pecto-cellulosique complétée par des dépôts cireux.



cuticule



Stomate de feuille de Muguet
(en coupe transversale)

Des tissus assimilateurs, des parenchymes chlorophylliens présentant entre cellules de nombreux méats facilitant la circulation diffusive des gaz en phase gazeuse, et une paroi pecto-cellulosique primaire hydratée permettant la dissolution du CO₂ notamment, condition indispensable à son entrée cellulaire dans le cadre de la photosynthèse...

- parenchyme palissadique : disposition géométrique qui facilite la transmission de la lumière d'une couche à l'autre...
- mésophylle : cellules chlorophylliennes classiques
- mésophylle // gaine périvasculaire des plantes en C₄-C₃ : dans mésophylle, plastes à activité photochimique et carboxylation réductrice en C₄ via PEP-carboxylase, dans GPV, plastes avec carboxylation réductrice en C₃ via Rubisco.

2. CROISSANCE ET RAMIFICATION DES AXES VEGETATIFS

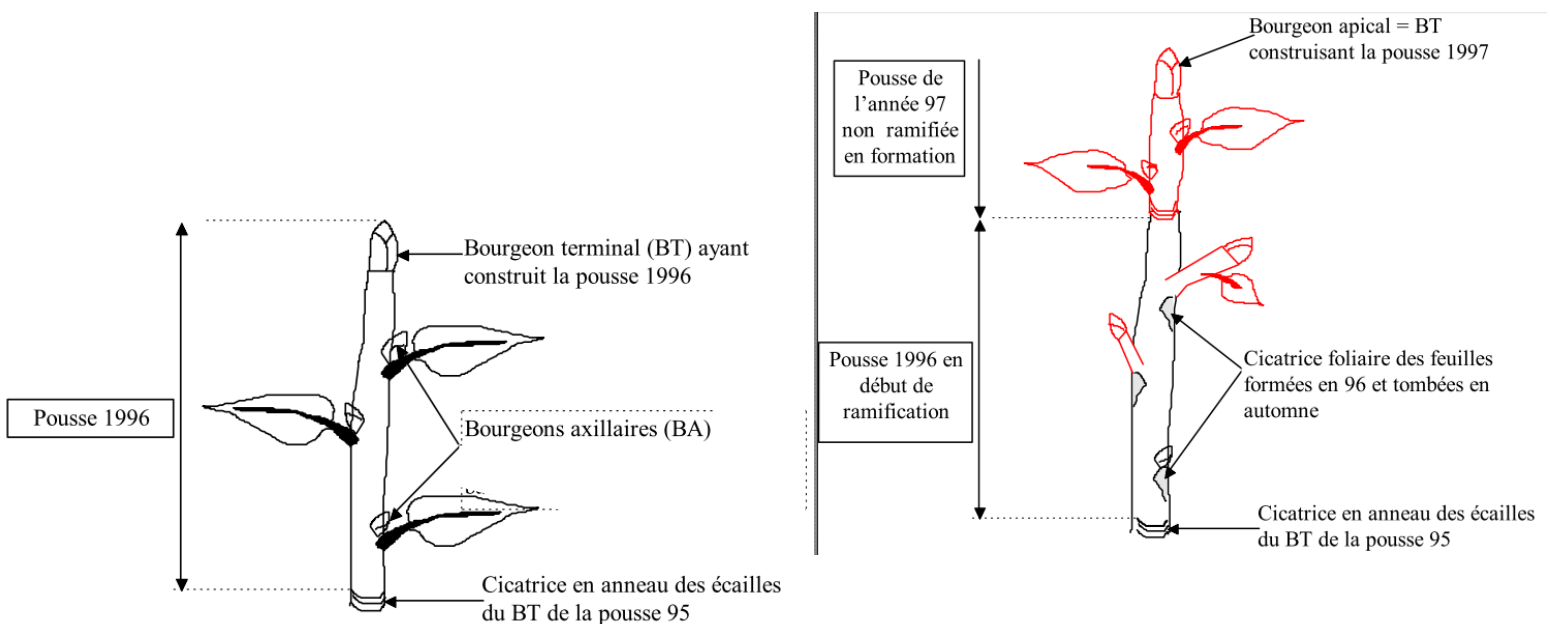
2.1 La tige feuillée est organisée en unités de croissance

a. une succession d'unités annuelles sur la tige ligneuse

Outre la présence de feuilles, la principale caractéristique d'une tige est de porter un ou plusieurs bourgeons qui sont pour la plupart à l'origine de sa croissance et de sa ramification. L'étude de ces organes sera faite dans un deuxième temps.

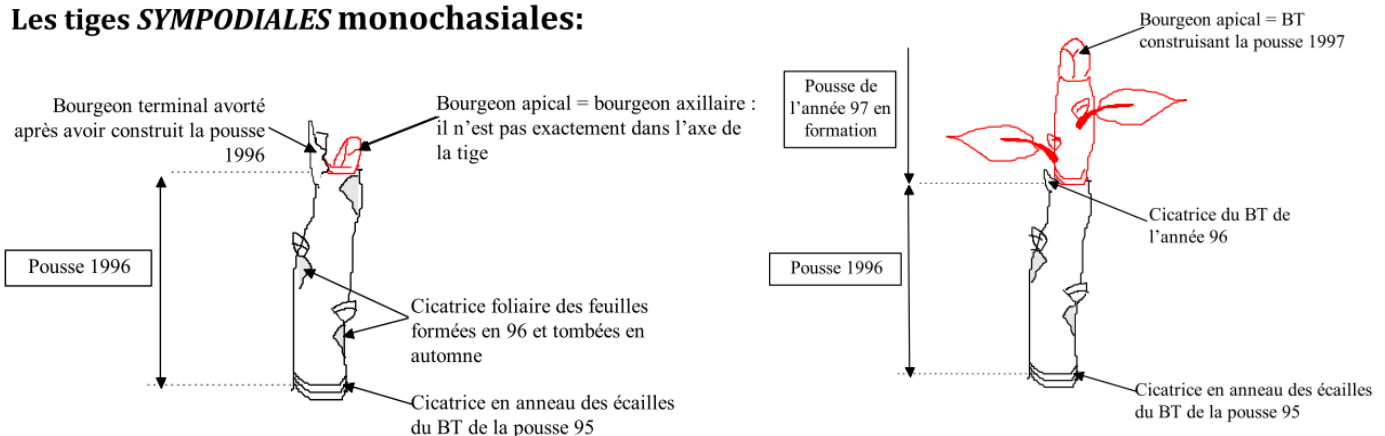
On peut repérer sur une tige ligneuse la présence de cicatrices formées lors de la chute des écailles qui entourent le bourgeon : elles permettent donc de localiser l'emplacement du bourgeon avant que celui-ci ne débourre et produise une nouvelle unité de croissance. En général, ces unités sont annuelles.

Suivant la place et le nombre de bourgeons impliqués dans cette croissance en longueur, on distingue différents schémas :

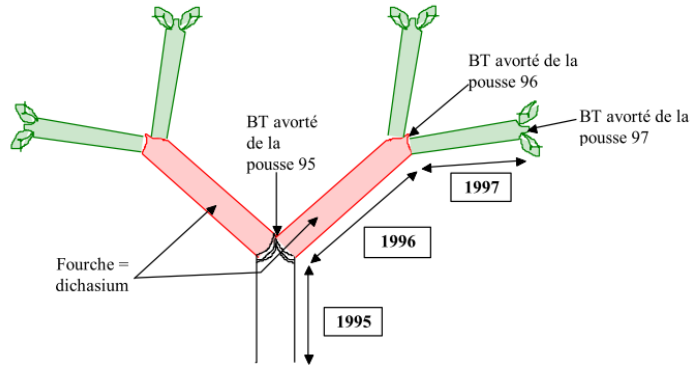
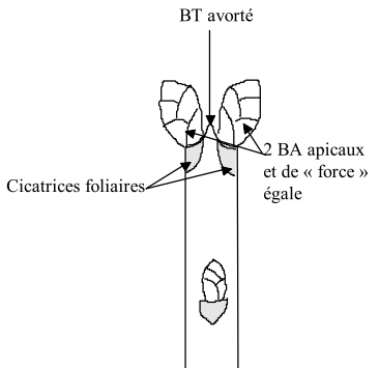


- la **croissance monopodiale** : les unités de croissance dérivent du développement du bourgeon terminal de l'axe ;
- la croissance sympodiale : les unités de croissance dérivent d'un ou de deux bourgeons axillaires (dichotomique avec implication de deux bourgeons opposés comme chez le Lilas), le bourgeon terminal ayant avorté ou étant un bourgeon floral (ce qui épuise son aptitude à organiser la croissance végétative).

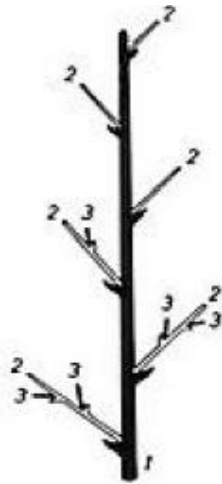
Les tiges SYMPODIALES monochasiales:



**Cas des tiges à feuilles opposées :
Croissance sympodiale Dichasiale**



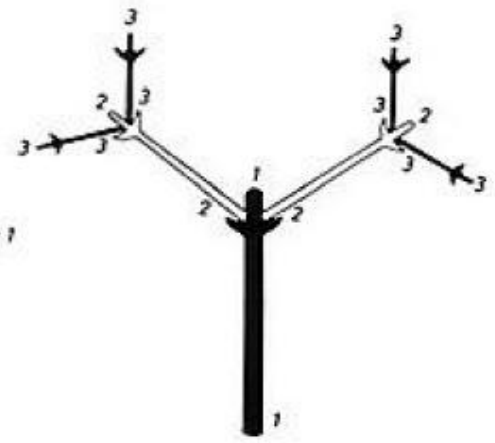
BILAN
:



Croissance Monopodiale

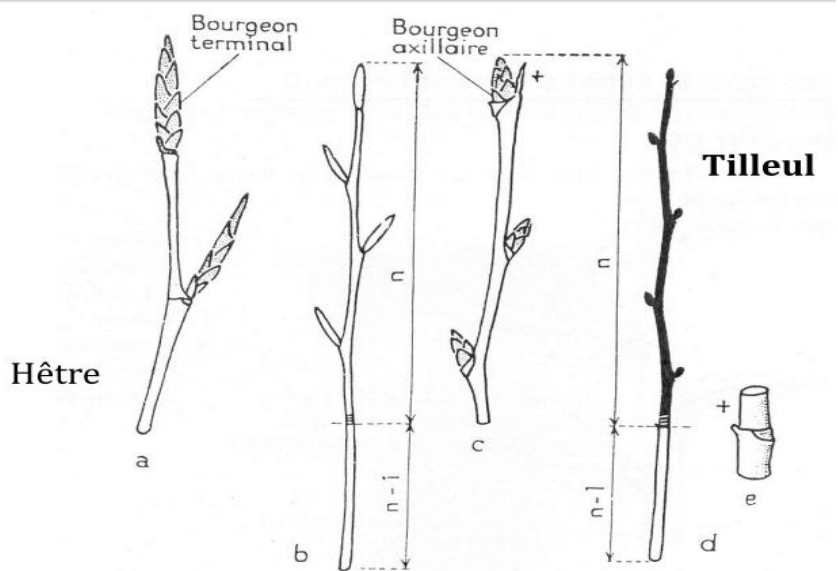


Croissance sympodiale Monochasiale



Croissance sympodiale Dichasiale

COMPARAISON MONOPODIAL / SYMPODIAL MONOCHASIQUE



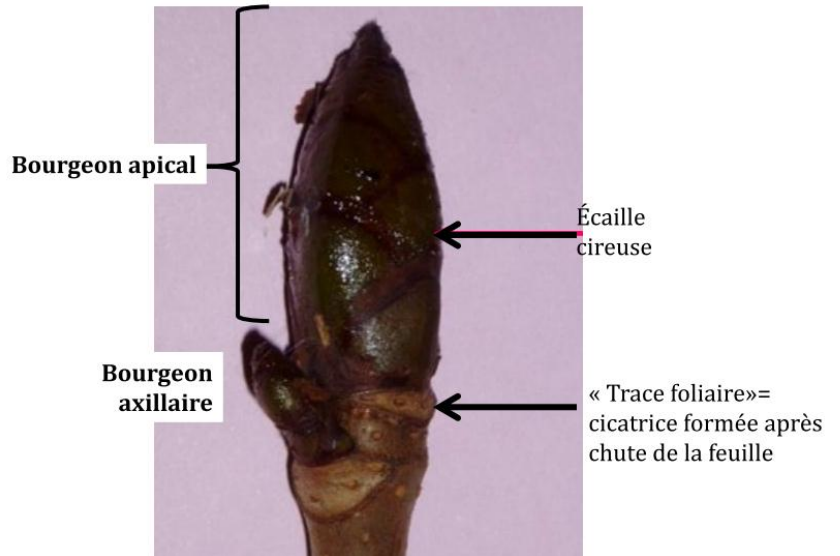
Les unités de croissance d'une tige ligneuse attestent d'une croissance et d'une ramification discontinues.

b. organisation des bourgeons : organes de croissance de la tige

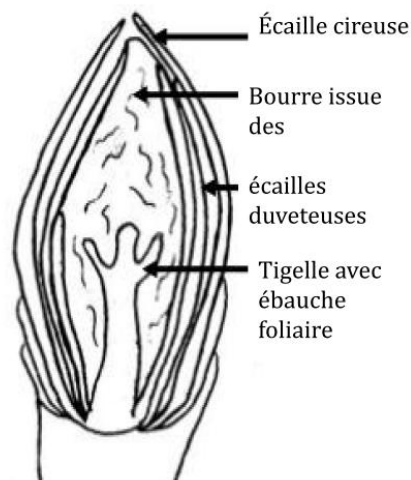
Les tiges ligneuses à croissance pluriannuelle portent des bourgeons écailleux.

Les écailles recouvrent une tige embryonnaire flanquée d'un nombre variable d'ébauches foliaires et protégée dans un duvet plus ou moins dense, la bourre. Les écailles grâce à leur revêtement cireux, la propolis, limite l'éventuelle déshydratation du bourgeon ; avec la bourre, elles constituent aussi une protection mécanique.

La bourre a cependant davantage un rôle thermoprotecteur d'isolant.



➔ dissection d'un bourgeon écailleux

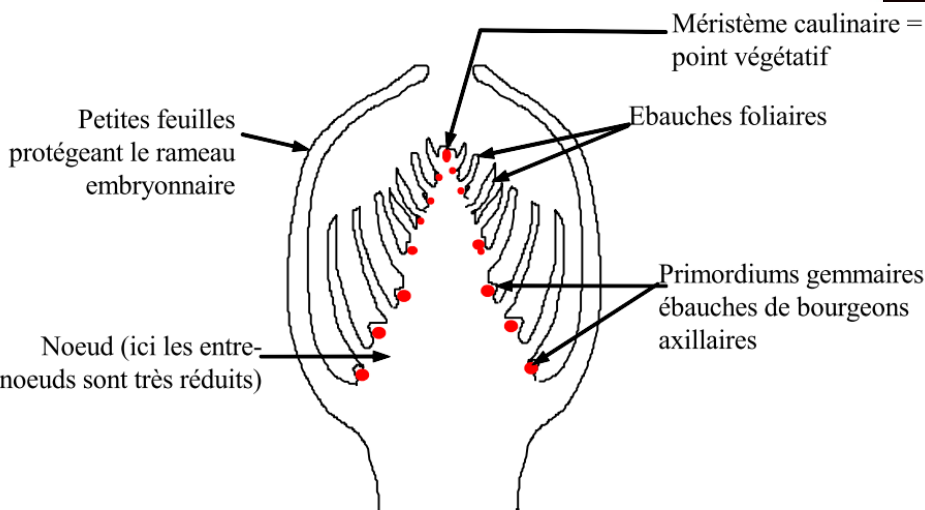


Remarque : il arrive aussi qu'à l'intérieur du bourgeon, des boutons floraux soient dissimulés : ce sont alors des bourgeons floraux que l'on distingue parfois aussi des bourgeons « à bois » par leur forme plus ventrue.

c. particularités des tiges herbacées

Les tiges herbacées annuelles portent aussi un bourgeon végétatif à l'apex de l'axe principal et de chacune de ses ramifications (à moins qu'il n'ait évolué vers un stade floral) ; il s'agit d'un bourgeon nu, sans écailles et dont on reconnaît souvent les ébauches foliaires qui l'entourent.

→ observation du bourgeon nu « chou de Bruxelles » ...un bourgeon axillaire qui lui-même en contient de nombreux autres...



C.L de bourgeon végétatif nu

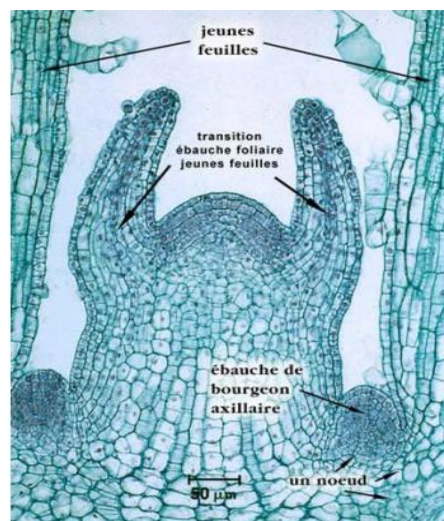
Le fonctionnement quasi-continu du bourgeon nu au cours de la saison végétative est à l'origine du plan d'organisation longitudinale de la tige feuillée : chaque axe constitue une seule unité de croissance, lui-même organisé en une succession de phytomères. Les différentes unités témoignent de la ramification de la tige feuillée au cours de son unique saison végétative.

d. dans tous les cas, au cœur d'un bourgeon végétatif : un apex

A l'extrémité des tiges embryonnaires présentes au cœur des bourgeons, se situe un apex caulinaire dont l'organisation peut être observée :

→ exemple dans un bourgeon d'Erable

Son fonctionnement est abordé dans le chapitre de cours consacré à la croissance de l'appareil végétatif.



CL de bourgeon végétatif d'Erable

2.2 La racine s'allonge et se ramifie également

La croissance en longueur de la racine ne fait apparaître aucune trace à sa surface, même chez les végétaux pluriannuels. L'allongement des axes racinaires repose sur une intense activité mitotique dans le méristème situé près de l'apex ainsi que sur l'élongation des cellules nouvellement produites dans la région séparant l'apex de la zone pilifère.

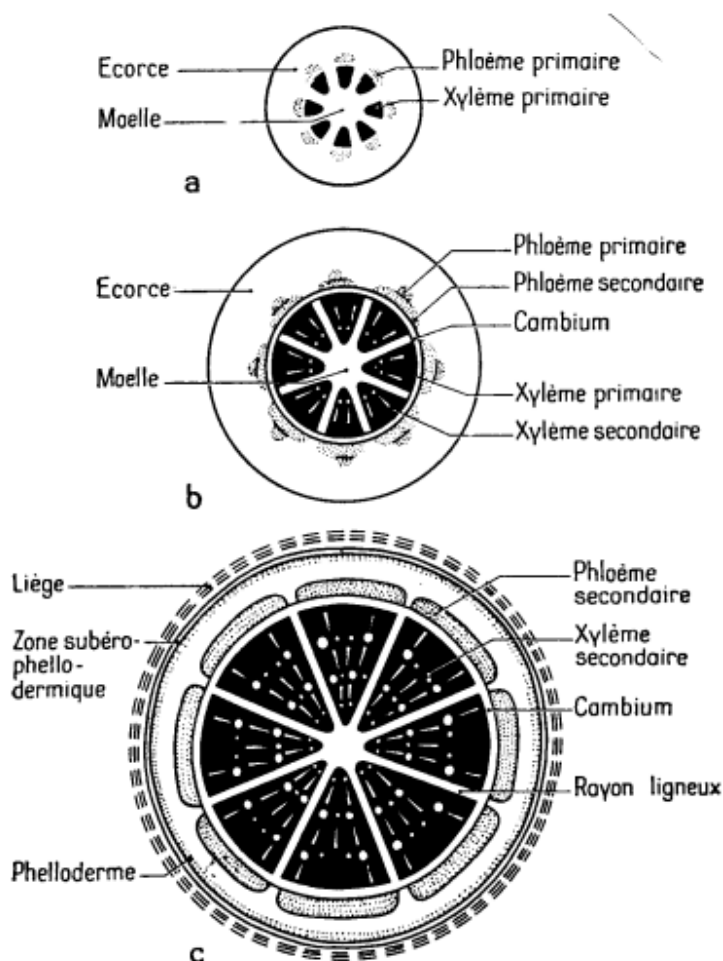
La ramification fait apparaître de nouveaux axes racinaires eux-aussi terminés par un apex. Cette ramification se localise dans le secteur subérisé de la racine qui fait suite au secteur absorbant : des cellules du péricyle reprennent une activité mitotique et organisent un amas cellulaire qui déforme l'endoderme et pénètre radialement le cortex en le traversant de manière centrifuge. Au cours de cette « traversée », ce massif de cellules s'organise en un nouvel apex qui organise la croissance en longueur du nouvel axe dès qu'il émerge en surface de la racine qui le porte.

2.3 Les organes axiaux s'épaississent par adjonction de nouveaux tissus chez de nombreuses angiospermes

a. tissus secondaires et formation d'un pachyte

L'ajout de nouveaux tissus dans un organe axial peut être mis en évidence en observant des coupes réalisées au travers d'une tige dans différents secteurs d'âges distincts.

Ceci caractérise aussi bien la tige que la racine sauf chez certaines familles comme les Poacées.



Croissance en épaisseur et mise en place des tissus secondaires dans une tige de

Hêtre :

- a.) structure primaire : 1 cycle de faisceaux cribro-vasculaires.
- b.) fin de la mise en place du cambium (structure âgée d'1 an). Le cambium est continu.
- c.) tige âgée de 3 ans : le Phloème I a été écrasé par la croissance des zones profondes et par l'activité du phellogène. La structure II de tige est reconnaissable car les pôles ligneux sont dirigés vers la moelle.

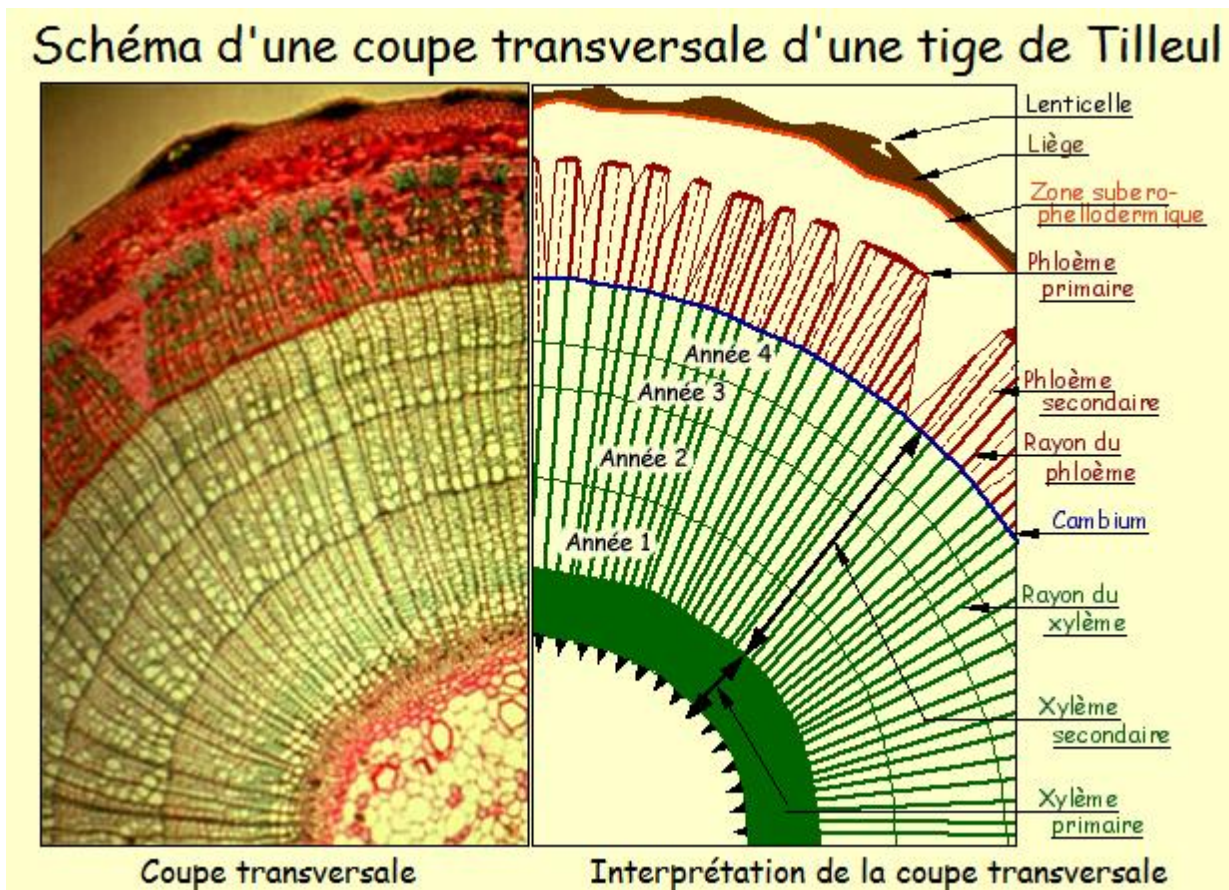
Il apparaît ainsi que des tissus caractérisés par une disposition alignée des cellules qui les constituent suivant la direction radiale s'ajoutent progressivement aux tissus primaires.

Ces tissus sont :

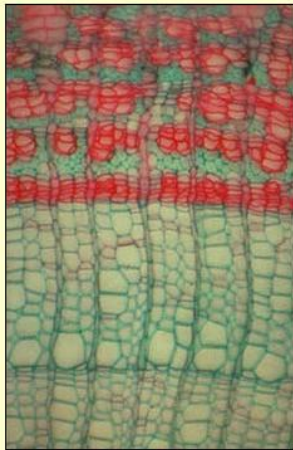
- ligneux et colorés en vert vers l'intérieur : il s'agit de xylème secondaire ou BOIS
- cellulosique et colorés en rose vers l'extérieur : il s'agit de phloème secondaire ou LIBER
- produits par une assise génératrice qui se situe entre bois et liber : le CAMBIUM libéro-ligneux (méristème secondaire).

Par leur mise en place, ces tissus secondaires repoussent vers l'extérieur et déforment par étirement les tissus corticaux (épiderme, parenchyme cortical, éventuellement endoderme) et le phloème I. Ils repoussent aussi vers l'intérieur en les écrasant les tissus centraux (xylème I et parenchyme médullaire) si bien que leur reconnaissance n'est souvent plus possible.

Le cambium libéro-ligneux et l'ensemble des tissus secondaires qu'il a produit forment un cylindre tissulaire appelé **pachyte** (étymologiquement épais).



Détail de la zone cambiale d'une coupe transversale d'une tige de tilleul.



Détail de la zone cambiale d'une coupe transversale

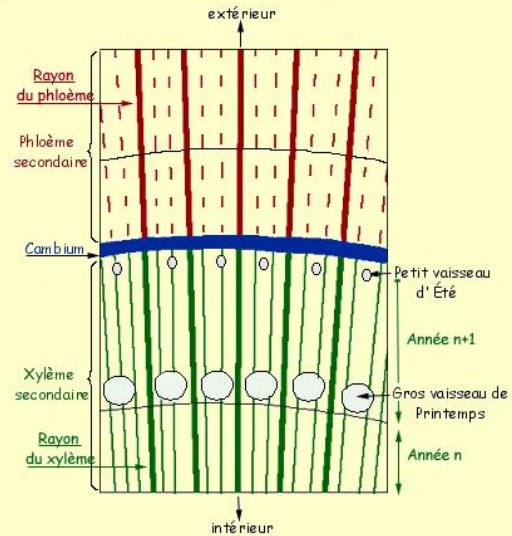


Schéma du détail de la zone cambiale d'une coupe transversale

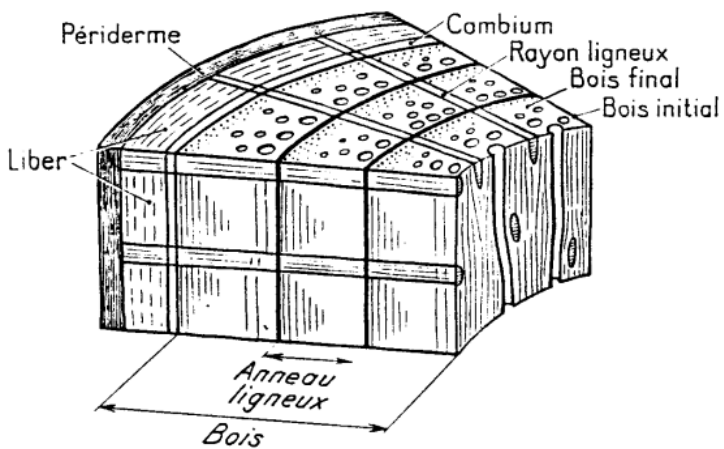
b. fonctionnement rythmique du cambium libéro-ligneux

L'observation de coupes transversales de bois et/ou de préparations microscopiques montrent une organisation du BOIS « tissu » en cernes concentriques. Chaque cerne correspond au volume de bois produit durant une saison végétative. Ils sont délimités par des variations brutales de la qualité du bois : au bois de printemps riche en vaisseaux larges et pauvre en fibres, fait progressivement suite un bois d'été plus riche en fibres, plus pauvre en vaisseaux et d'apparence plus serrée (plus dense),... puis sans transition, un nouveau bois de printemps.

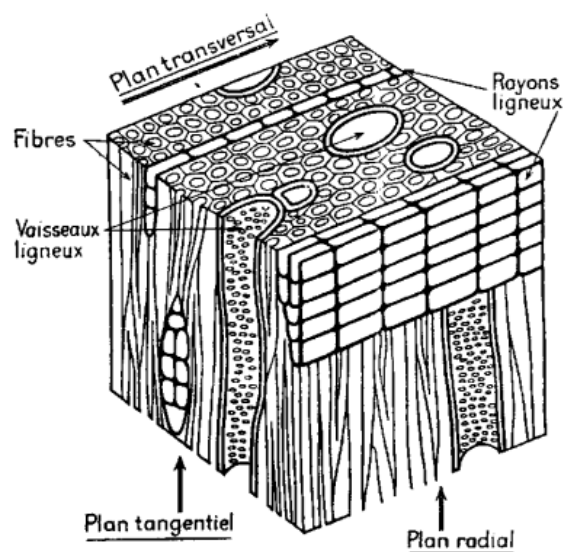
Le bois est aussi traversé de nombreux rayons parenchymateux.

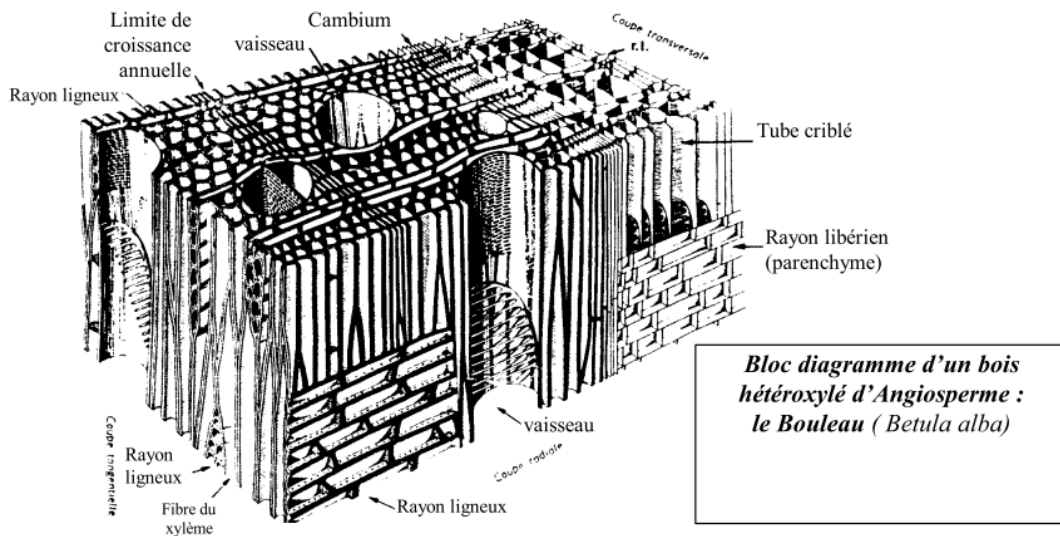
Une autre assise cambiale située plus à l'extérieur dans l'écorce produit également, et de manière cyclique vers l'extérieur un tissu de protection, le suber, et vers l'intérieur quelques cellules parenchymateuses, le phelloderme.

Comme le bois et le liber, on reconnaît ces tissus secondaires à l'alignement de leurs cellules.



Bloc diagramme montrant l'organisation générale d'une tranche de bois





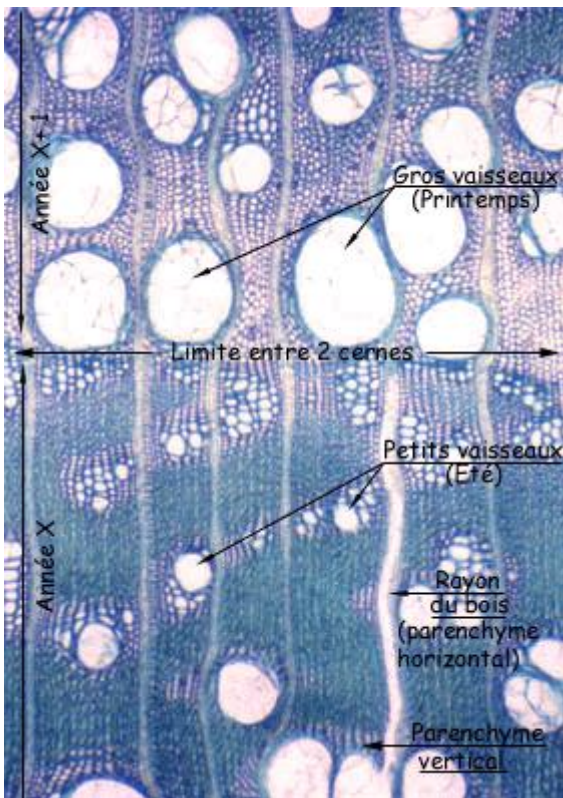
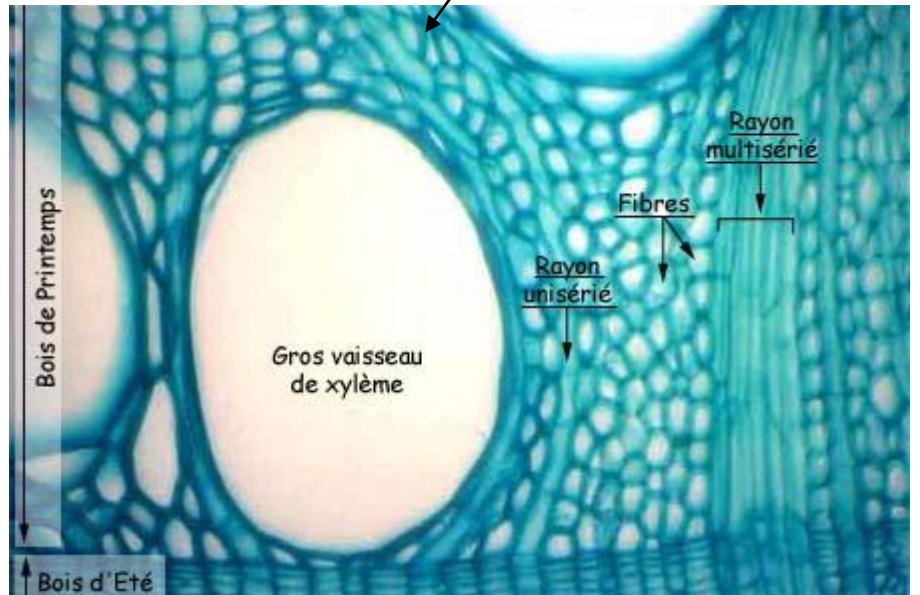
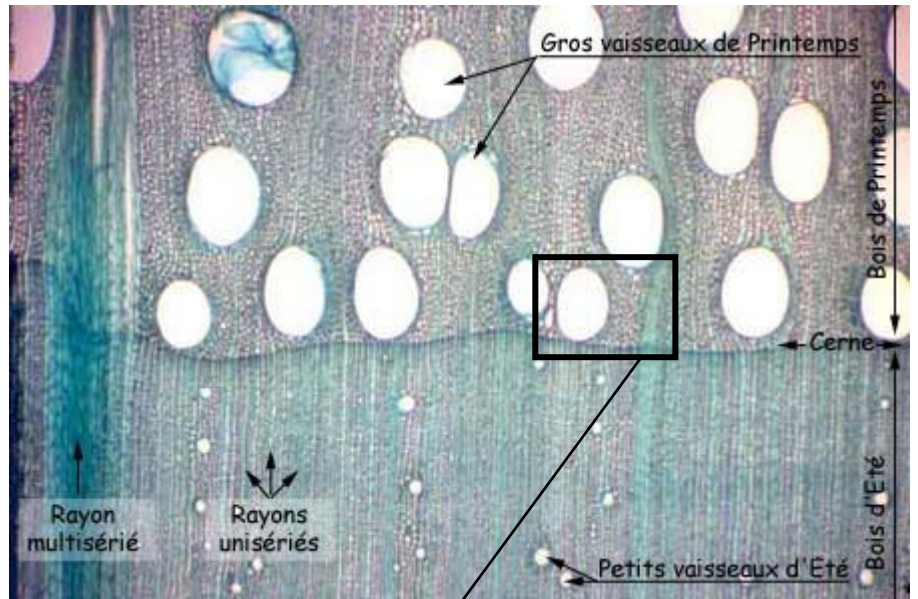
c. propriétés du bois et du liber

| | BOIS | LIBER |
|--|---|--|
| Système vertical | Vaisseaux ponctués → conduction et passage d'un vaisseau à l'autre, distribution aux cellules parenchymateuses | Tubes criblés et cellules compagnes → conduction et distribution |
| | Parenchyme vertical : mise en réserve | Parenchyme libérien → réserve |
| | Fibres xylémiennes → soutien | Fibres (éventuellement lignifiées) → soutien |
| Système radial | Parenchyme des rayons : symplasma assurant <ul style="list-style-type: none"> - la distribution radiale des assimilats, de l'eau et des ions depuis les éléments conducteurs - la mise en réserve | |
| Remarques : <ol style="list-style-type: none"> 1. les éléments de vaisseaux du xylème se terminent par des cloisons en biseau, perforées → continuité longitudinale de la colonne de sève. 2. Conduction et soutien sont assurés par deux types cellulaires distincts, spécialisés, les vaisseaux et les fibres : le bois des angiospermes est dit hétéroxylé (à la différence de celui des pinophytes...) | | |

En microscopie, le bois peut être observé suivant différents plans de coupe : les coupes transversales montrent l'extension radiale des rayons parenchymateux tandis que les coupes longitudinales tangentielle et radiales montrent l'allongement vertical des vaisseaux, des fibres et d'une partie du parenchyme.

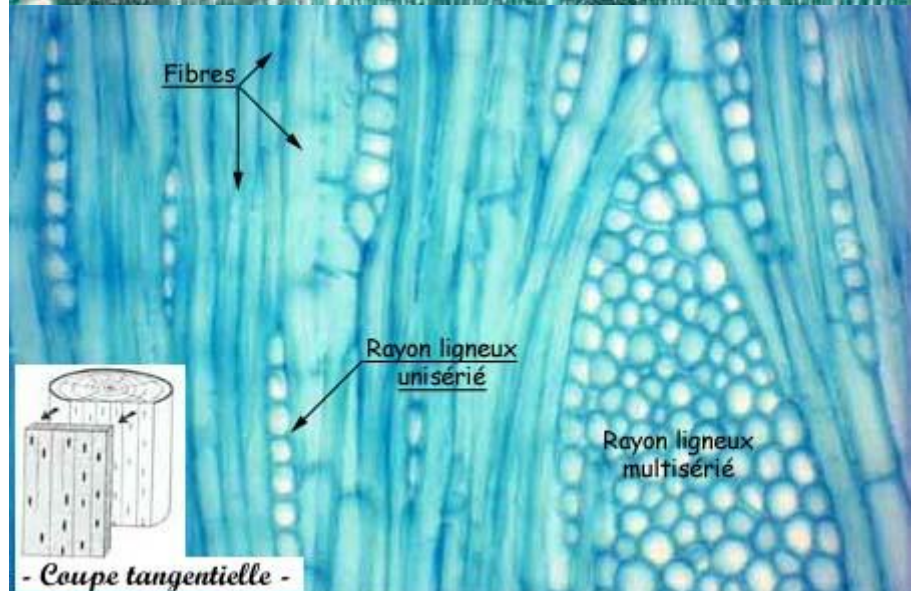
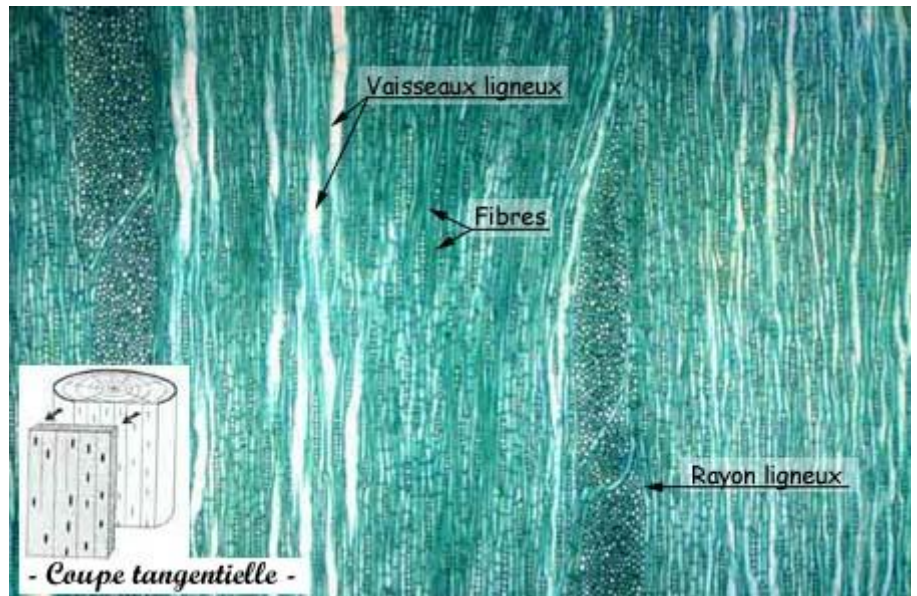
En coupe longitudinale tangentielle, on notera l'aspect plurisériel des rayons (épais de plusieurs couches de cellules disposées parallèlement), tandis que les coupes longitudinales radiales permettent d'observer les ponctuations entre vaisseaux et parenchyme radial.

Coupe transversale de bois de Chêne (vue générale et détail)



Détail entre deux cerne chez le Robinier faux acacia

Coupe longitudinale tangentielle de bois de Chêne (vue générale et détail)



Les coupes de bois montrent souvent différents aspects concentriques ; de la périphérie au centre, on distingue l'écorce qui correspond presque exclusivement au suber, le liber, l'aubier qui constitue le bois fonctionnel aux vaisseaux fonctionnels, et le duramen, plus riches en tanins et dont les vaisseaux sont bouchés par des thylls, des expansions des cellules parenchymateuses qui les jouxtent.

Bilan : La mise en place de tissus secondaires est due au fonctionnement de méristèmes secondaires qui permettent aux angiospermes de disposer de davantage de tissus de soutien, de conduction, et de stockage adaptés aux besoins d'un appareil végétatif qui s'allonge et se ramifie de manière « indéfinie ».

Parmi ces tissus, certains d'entre eux sont vivants et sont dépendants entre autres de la redistribution et du partage des photoassimilats foliaires de sorte qu'en vieillissant un arbre atteint un jour un état d'équilibre entre sa production et sa consommation, laissant alors peu de place pour alimenter la poursuite de sa croissance...sa productivité nette devient alors nulle ! Ceci est important pour qui veut faire d'une forêt une ressource durable et pas seulement un patrimoine esthétique, les deux n'étant pas incompatibles.

3. ADAPTATIONS DES ORGANES VEGETATIFS DES ANGIOSPERMES A LA MISE EN RESERVE

Les organes de réserve sont souvent souterrains ; ils sont donc relativement protégés du froid hivernal. Il peut s'agir de bulbes (tiges en plateau orthotropes portant des feuilles), de rhizomes (tiges souterraines plagiotropes), de tubercules (portions de tiges ou de racines).

Certains sont pluriannuels (bulbes du lis, rhizome du muguet), d'autres sont annuels (bulbes de l'oignon, tubercules caulinaires de la pomme de terre, tubercule racinaire de la carotte, tubercule hybride hypocotylaire et racinaire du radis, tubercule hybride caulinaire et racinaire du céleri-rave...

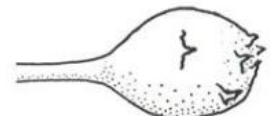
➔ Cas de la pomme de terre : La germination d'une pomme de terre donne, à partir des substances qui y ont été accumulées, des tiges à croissance verticale. Alors que le tubercule se vide, c'est dans un premier temps des feuilles écailleuses et des racines adventives qui sont produites. Puis, après la sortie du sol par le bourgeon végétatif, ce sont des feuilles larges vertes et chlorophylliennes qui sont produites, puis plus tard, des rameaux florifères.

Lorsque la partie aérienne est bien développée, des bourgeons axillaires souterrains, à l'aisselle des feuilles écailleuses, se développent en des rameaux plagiotropes ou STOLONS.

Après une phase de croissance en longueur, les stolons cessent de s'allonger. Ils reçoivent alors des parties aériennes des glucides (saccharose ou glucose) qu'ils transforment et accumulent sous forme d'amidon.

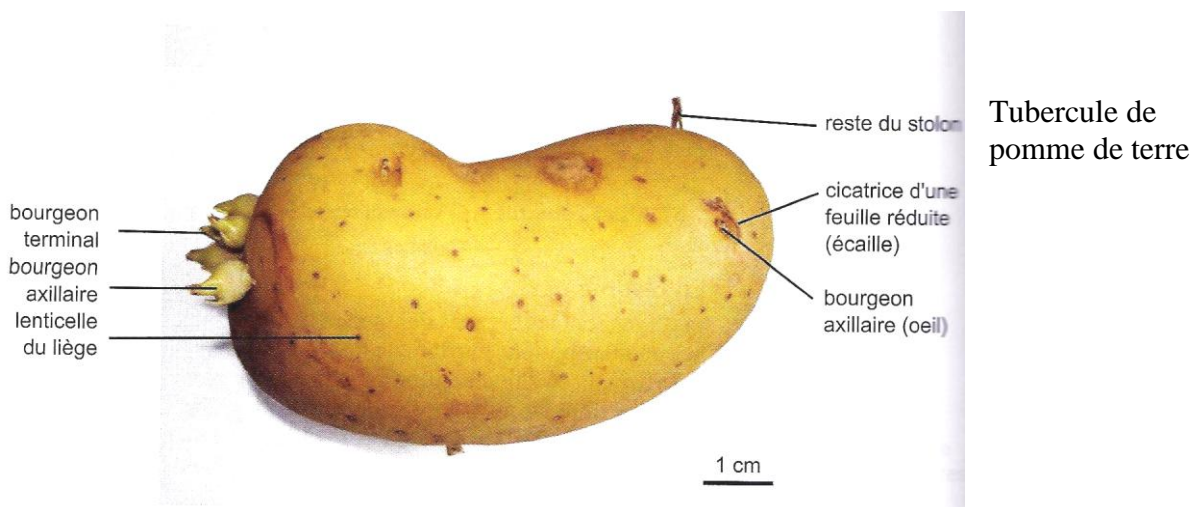
Plusieurs entre-noeuds de l'extrémité se renflent et se tubérisent.

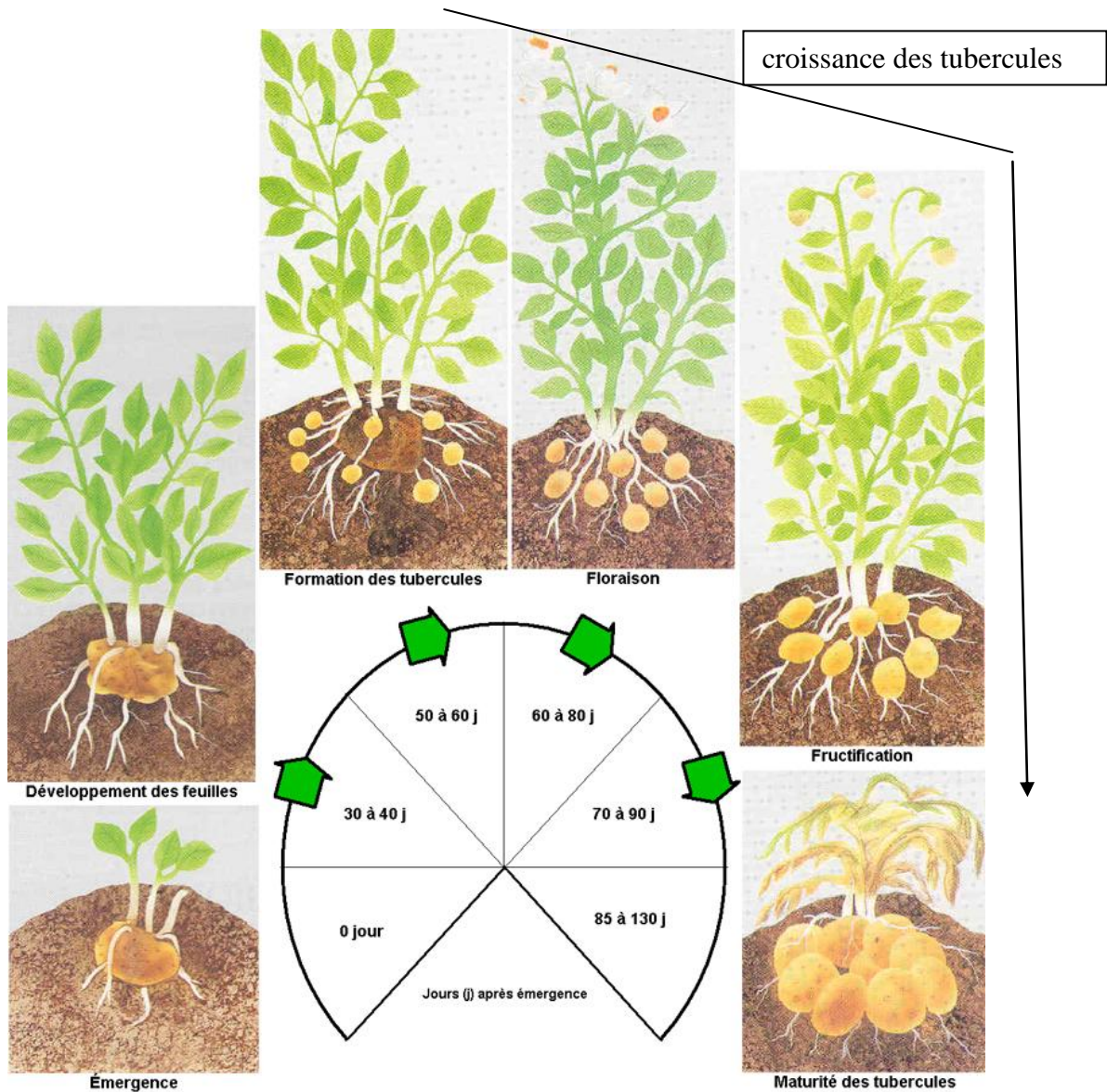
Chaque extrémité de stolon devient ainsi une nouvelle pomme de terre.



Extrémité d'un stolon et formation d'un tubercule

Au retour de la mauvaise saison, les parties aériennes meurent mais aussi les parties souterraines qui ne sont pas tubérisées et qui jusque-là réunissaient les différents tubercules en formation. Les tubercules nouvellement formés deviennent donc indépendants les uns des autres.



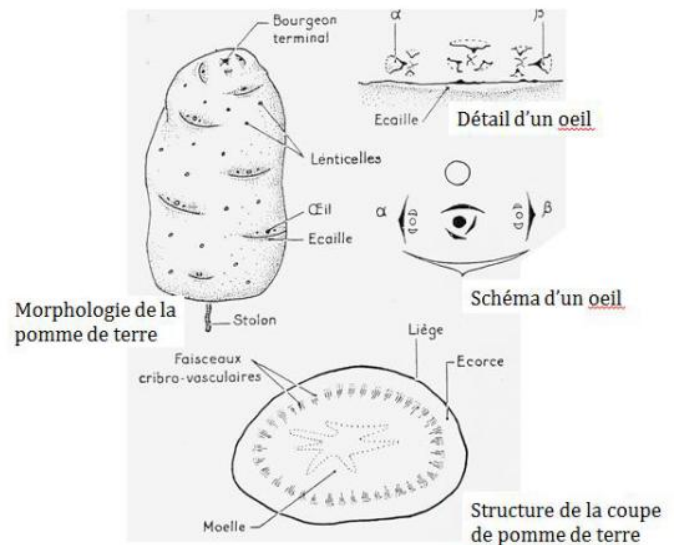


Chaque nouveau tubercule étant susceptible de donner un nouveau pied de pomme de terre, la tubérisation est donc ici associée à un mode de reproduction asexuée.

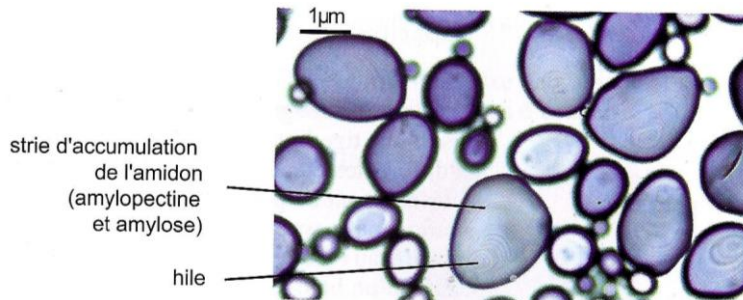
Sur une pomme de terre, on peut retrouver au niveau des « yeux » une structure de bourgeon axillaire : ce bourgeon est déjà organisé puisqu' autour de la zone centrale où se trouve un bourgeon « terminal », on distingue déjà 2 bourgeons axillaires repérables grâce à 2 petites écailles (α et β) à l'aisselle desquelles ils se sont formés.

La structure d'une CT de pomme de terre montre une structure typique de tige dont le parenchyme médullaire est hypertrophié. \Rightarrow

on peut mettre en évidence avec de l'eau iodée (Iugol) la présence d'amidon : on obtient une coloration en bleu-violet.



→ montage de cellules médullaires avec amyloplastes et amidon entre lame et lamelle.

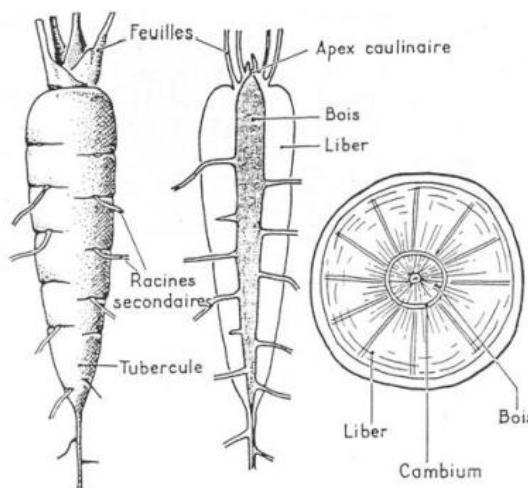


→ Cas de la carotte : La racine pivot constitue alors l'organe de réserve.

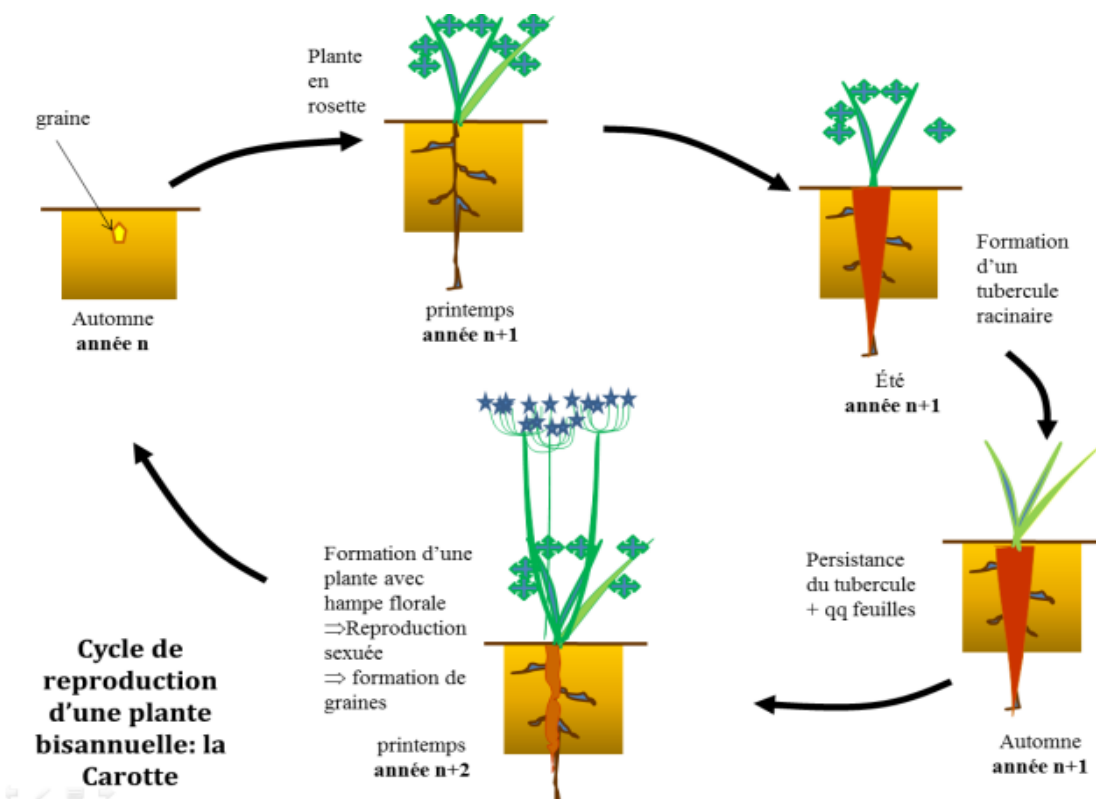
La plus grande partie des réserves de nature glucidique (un peu d'amidon mais surtout des sucres plus simples comme le saccharose à l'origine du goût sucré).

Les réserves sont surtout accumulées dans le liber (Phloème II)

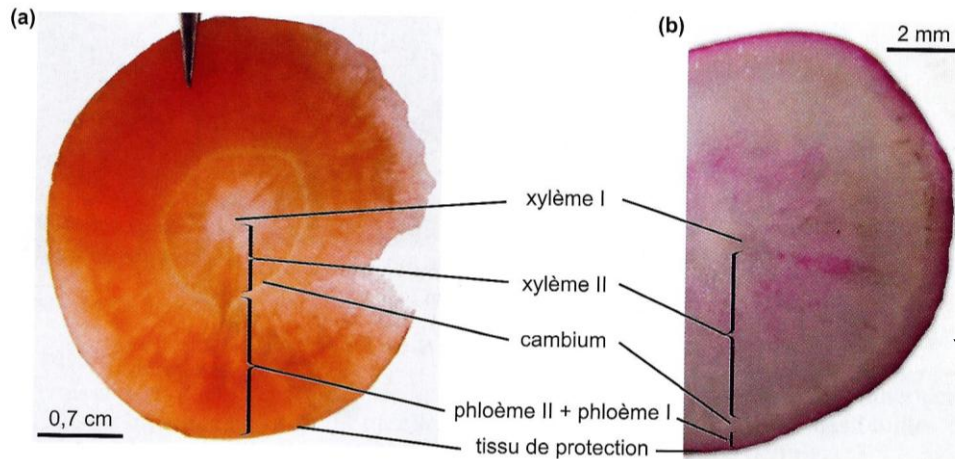
Les réserves interviennent dans un cycle typique de plante bisannuelle : la floraison et la production de graine ne se réalise que tous les 2 ans



Le tubercule racinaire de Carotte (*Daucus carotta*)



Cycle de reproduction d'une plante bisannuelle: la Carotte



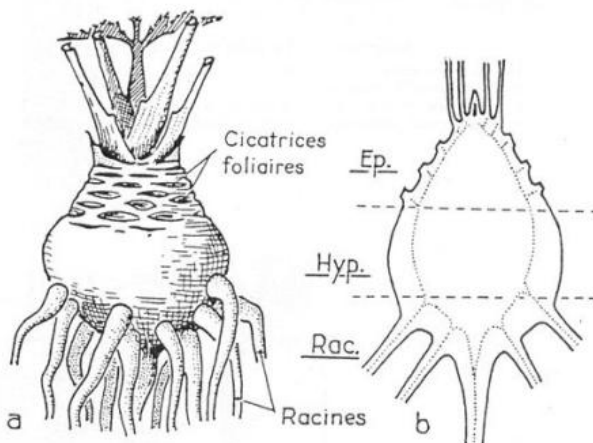
Comparaison de tubercule racinaire de carotte et du tubercule hybride de radis en CT

Des tubercules hybrides peuvent aussi être formés avec :

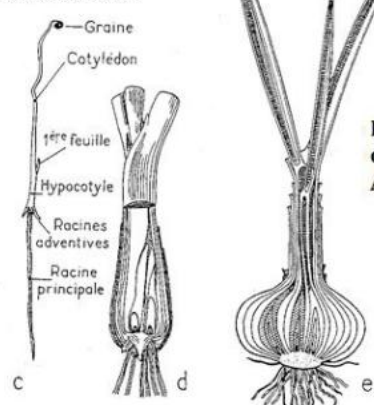
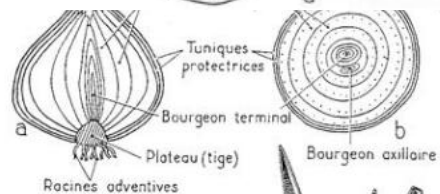
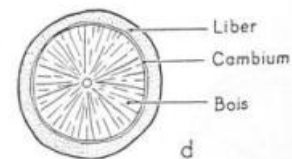
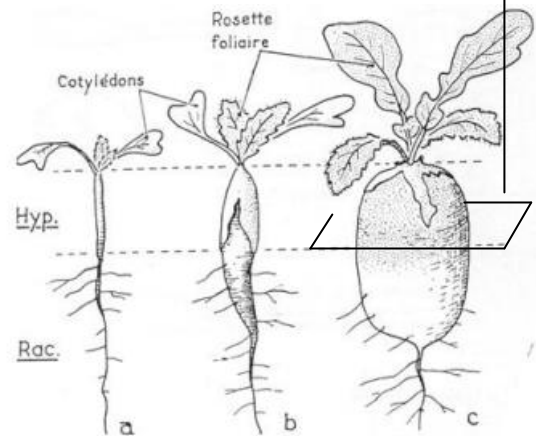
- L'hypocotyle, partie de la tige dépourvue de feuille
- la région supérieure de la racine principale. Ex : le Radis et la betterave
- éventuellement s'y ajoute la région inférieure de l'épicotyle. On y trouve alors des cicatrices foliaires.(tubercule de Céleri).

➔ Céleri-rave

Radis



- Tubercule du Céleri-rave.



L'oignon cultivé: **Allium cepa**

➔ Bulbe d'oignon :

Les feuilles présentent une base circulaire qui forme des manchons parfaitement continus, elles sont emboîtées les unes dans les autres.

Ces bases foliaires sont appelées TUNIQUES.

On distingue 2 types de tuniques :

1. Les tuniques internes sont gorgées de réserves : ce sont des tuniques charnues.
2. Les tuniques externes, fines et constituées de tissus mort: elles sont lignifiées et interviennent dans la protection du bulbe : ce sont des tuniques protectrices.

A partir du plateau, sont formées des racines adventives. On peut distinguer parfois, un bourgeon axillaire situé à côté du bourgeon terminal, au centre du bulbe.

Le cycle de développement de l'Oignon est aussi celui d'une plante bisannuelle

→ Bulbe et bulbilles d'ail

Le cycle de développement de l'Ail :

1. Une bulbille mise en terre donne comme l'Oignon, des feuilles aériennes. La tunique qui fournit les réserves se vide. La base des feuilles ne s'hypertrophie pas mais ce sont les bourgeons axillaires qui accumulent les produits de la photosynthèse des feuilles.

2. A l'arrivée de la mauvaise saison, les parties aériennes dégèrent et les bulbilles entrent en vie ralentie.

3. Chacune des bulbilles sera susceptible, lors de la prochaine saison de végétation, de donner un pied « indépendant » des autres et donc, une nouvelle « tête d'Ail ».

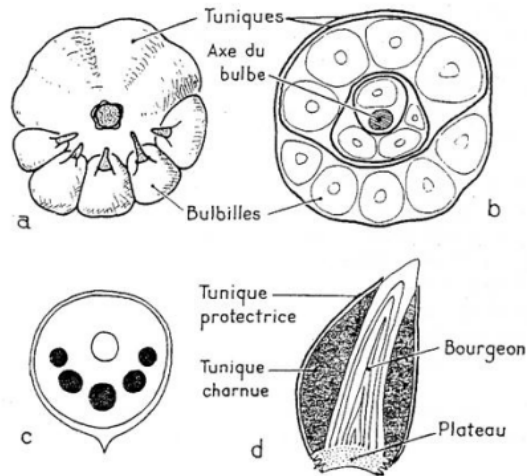
→ Les bulbilles sont à la fois

des organes de réserves

des organes de résistances à la mauvaise saison

des organes de multiplication végétative (ou reproduction asexuée)

⇒ L'Ail est une plante vivace



L'ail cultivée: *Allium sativum*

4. ADAPTATIONS DES ANGIOSPERMES A DIFFERENTS MILIEUX DE VIE

4.1 Adaptations à la vie en milieu aquatique

Les angiospermes peuvent présenter une immersion plus ou moins complète de leur appareil végétatif ;

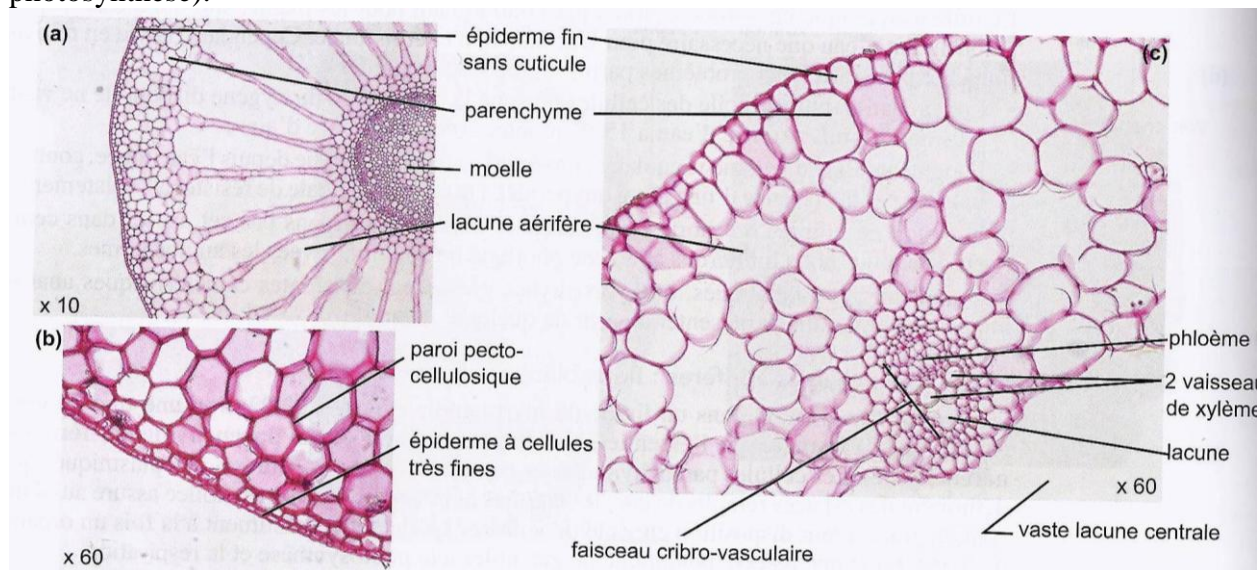
- certaines sont amphibies (présentant une partie assez importante de leur appareil végétatif hors de l'eau, exemple du roseau des étangs Typhacées)

-d'autres sont aquatiques et fixées avec des feuilles flottantes (Potamot, Renoncule aquatique), ou non

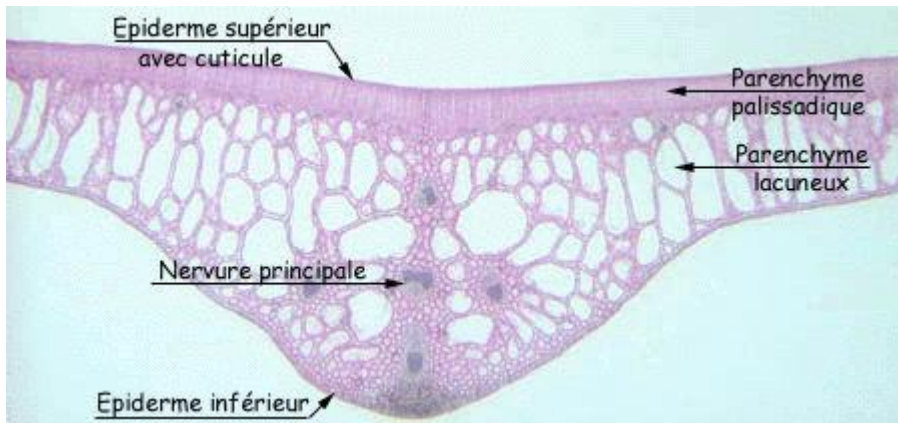
-d'autres enfin sont aquatiques libres (immergées ou flottantes).

a. un développement des parenchymes aérifères : aérenchymes

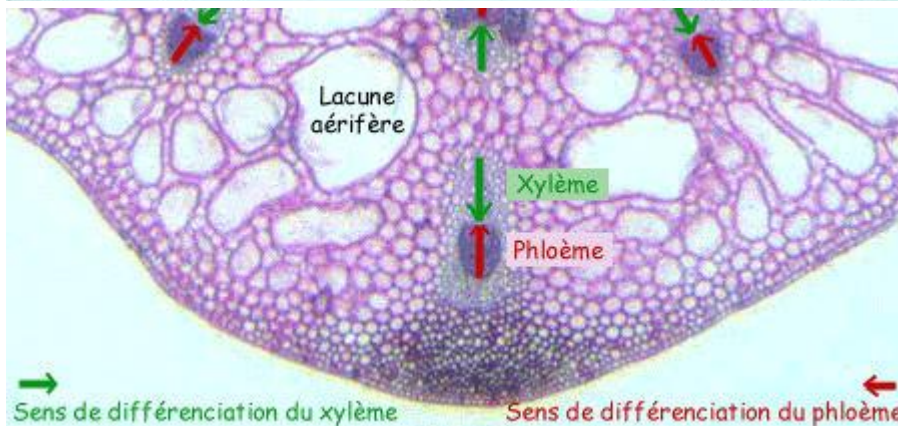
Les cellules parenchymateuses sont très digitées et présentent entre leurs doigts cytoplasmiques des lacunes remplies d'air. L'air assure flottaison et permet les échanges gazeux des cellules respiration et photosynthèse).



Coupes transversales de tiges de myriophylle (a +b) et de renoncule aquatique (c)



CT de feuille de nymphaea



b. une réduction des tissus de soutien

Ils sont en effet très réduits ou absents en relation avec le caractère portant de l'eau.

c. un épiderme sans cuticule facilitant les échanges hydrominéreaux

L'absorption hydrominérale peut être réalisée par diffusion sur toute la surface immergée.

Les gaz traversent l'épiderme à l'état dissous et permettent à l'aérenchyme d'être en équilibre avec le milieu ambiant pour ce qui les concerne.

En relation avec ce caractère, on remarque aussi une nette réduction du xylème, souvent remplacé plus ou moins largement par une lacune.

4.2 Adaptations à la vie en milieu sec : xérophytes

Cela concerne bien sûr les plantes des zones arides comme les déserts.

Le sol trop sec ne permet pas les mycorhizes et pose de problèmes d'approvisionnement hydrominéral, tandis que l'atmosphère peut induire un risque majeur de déshydratation.

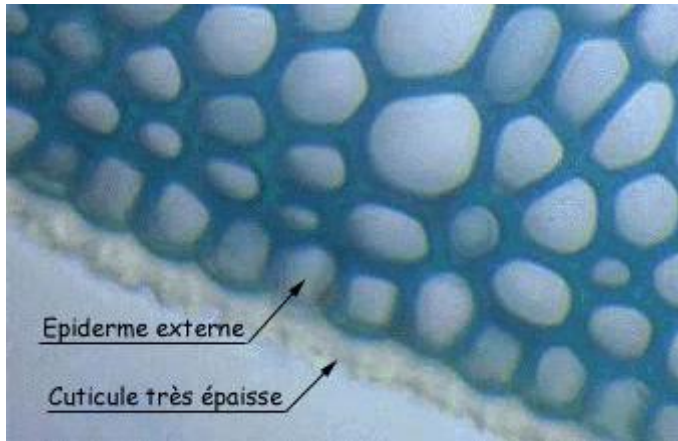
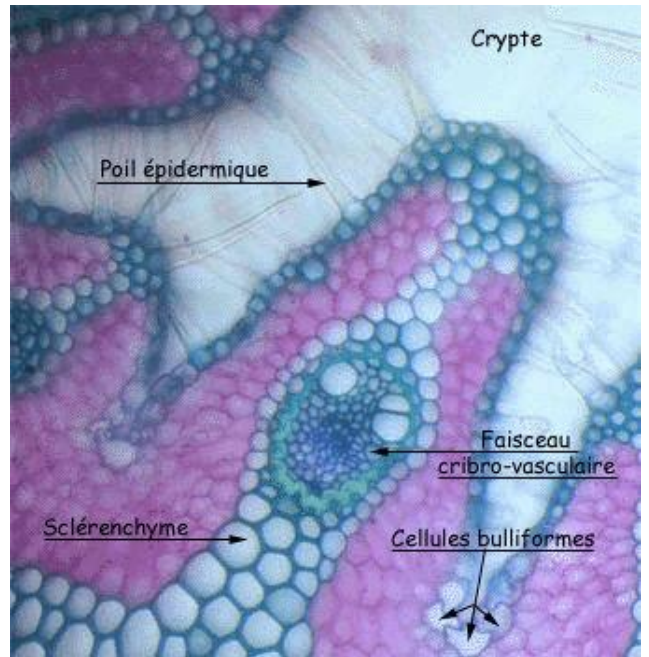
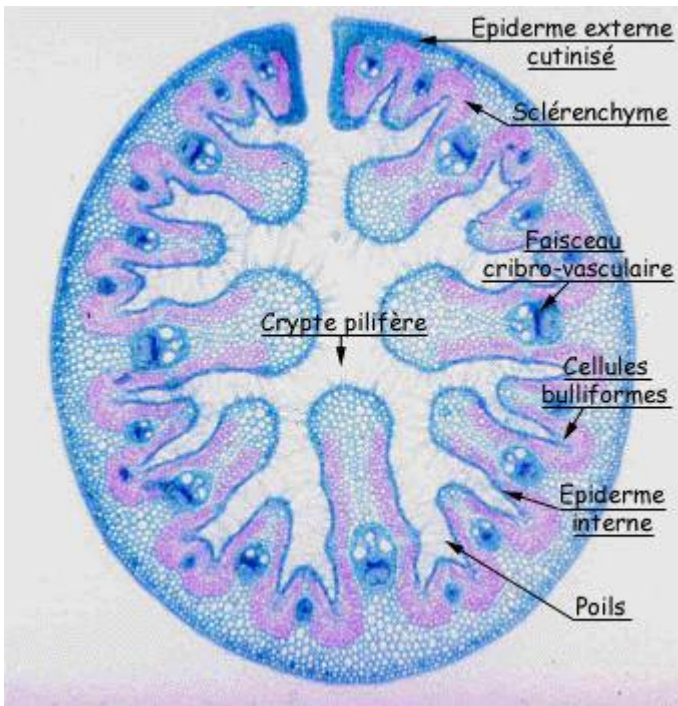
Toutes résistent à des déshydratations importantes (au moins 25% sans faner). On distingue les malacophytes, souvent charnues et molles (plantes grasses, succulentes), et les sclérophytes, plantes dures qui conservent un port dressé même quand elles sont fanées.

Certaines disposent d'un appareil racinaire surdimensionné apte à aller chercher l'eau en profondeur tandis que d'autres ont au contraire un appareil très superficiel capable de capter rapidement l'eau des rares précipitations avant qu'elle ne s'évapore.

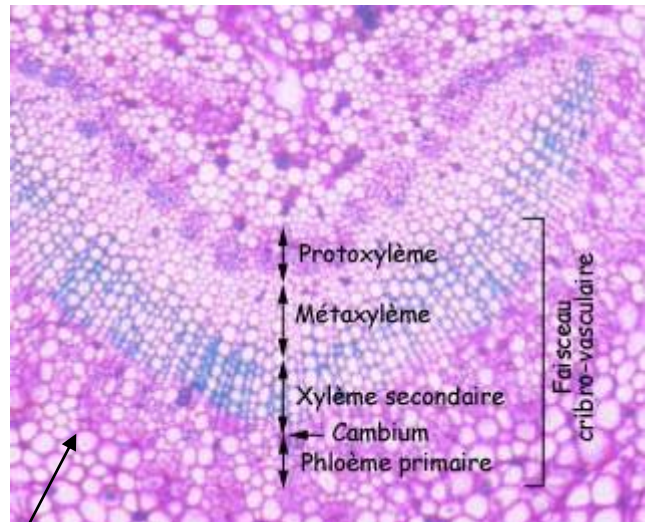
a. les sclérophytes

Elles sont caractérisées par des caractères leur permettant de limiter les pertes en eau.

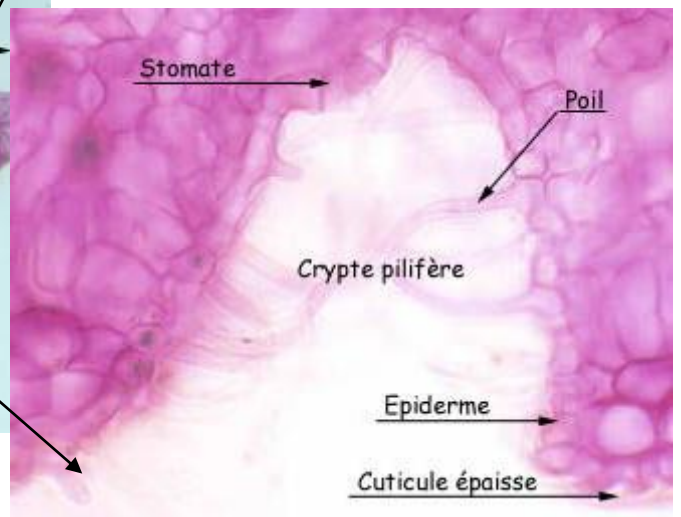
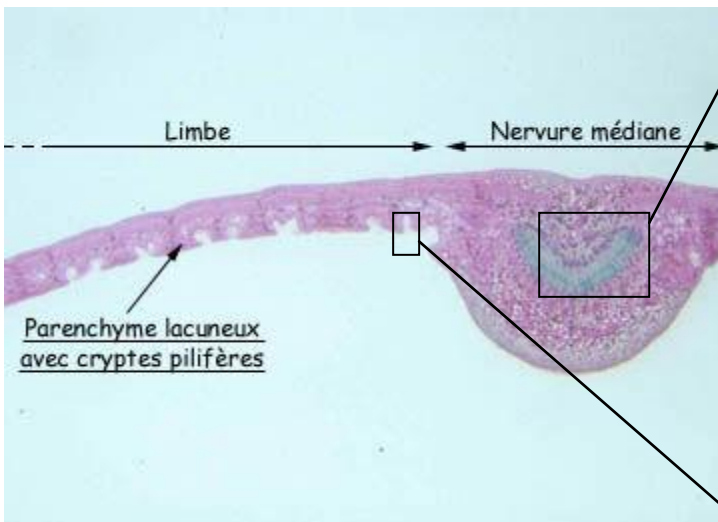
- cuticule épaisse sur la face ventrale des feuilles comme chez le Houx et le Laurier rose
- très peu ou pas de stomate sur cette même face foliaire
- protection des stomates :
 - cryptes stomatifères poilues chez le laurier rose
 - enroulement foliaire chez l'oyat grâce à du tissu bulliforme
- souvent beaucoup de sclérenchyme : réduit la dépendance à l'eau dans la fonction de soutien



Cas de l'Oyat, sclérophyte dunaire



Cas du Laurier rose :



D'autres caractères peuvent compléter l'éventail des adaptations :



- disposition des feuilles en rosette comme chez Tradescantia ce qui permet de limiter l'évaporation au contact des feuilles les plus basses et de capter efficacement la rosée
- réduction de la surface foliaire : petites feuilles alternant avec des épines réfléchissantes, créant une couche limite autour des feuilles et limitant ainsi la transpiration.

Tradescantia : feuilles en rosette

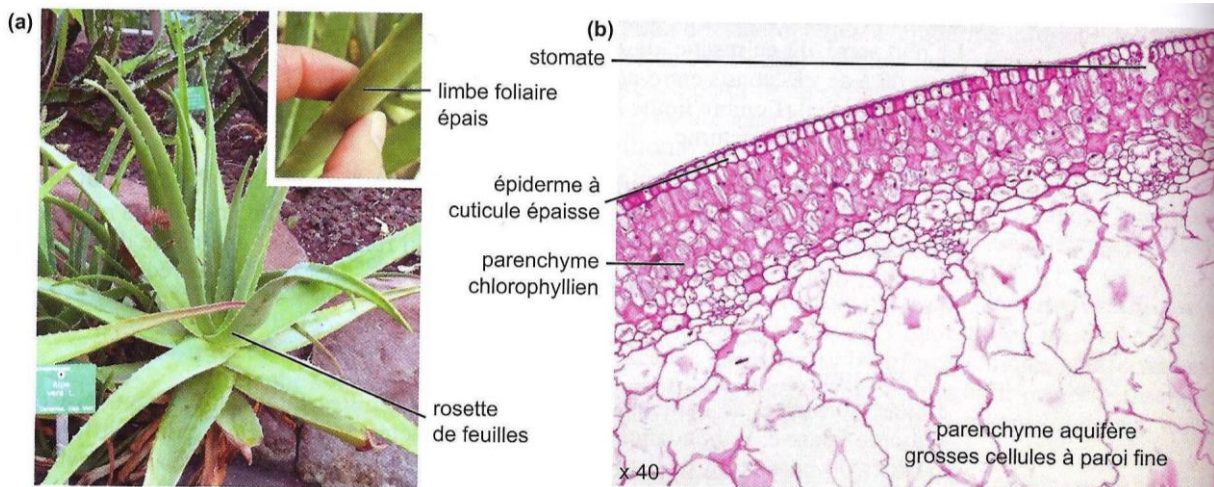


Tige de Fouquieria digueti , sclérophyte

- feuille caduque photosynthétique
- feuille réduite à une épine
- tige recouverte de suber

b. les malacophytes

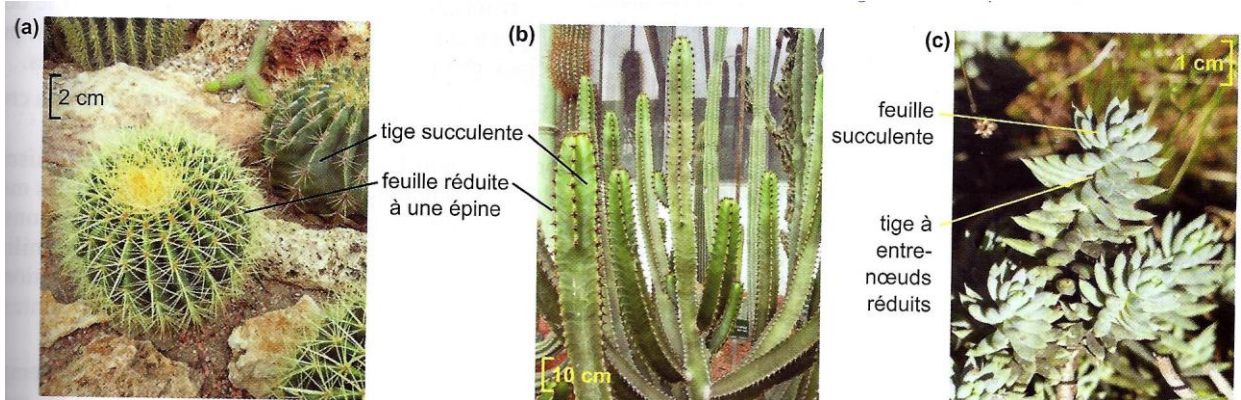
Chez certaines les tiges sont réduites avec des ports en rosette ou en boule au ras du sol limitant l'insolation directe et donc diminuant l'évaporation. Chez d'autres le tiges sont cependant bien développées.



Pied d'Aloes

CT feuille d'Aloes

Les tiges (cactus) ou les feuilles (sedum) sont succulentes ; quand il s'agit des tiges, elles portent des feuilles réduites à des épines.



Tige de cactus en boule
Cactus mamillaria

Tige d'Euphorbia
canariensis

Tige feuillée de sedum

Le caractère succulent des organes aériens leur confère un rapport S/V bien plus faible que chez les angiospermes mésophytes des régions tempérées ; ce caractère les rend moins vulnérables à la déshydratation et réduit d'ailleurs la perte en eau pour une même biomasse.

D'un point de vue anatomique, les organes succulents sont caractérisés par un parenchyme aquifère dont les cellules sphériques et à paroi fine disposent d'une vacuole riche en mucilage (glycoprotéines et polysaccharides) et gorgée d'eau (une tige de cactus contient ainsi plus de 80% d'eau).

Il est recouvert de parenchyme chlorophyllien et d'un épiderme à cuticule épaisse.