



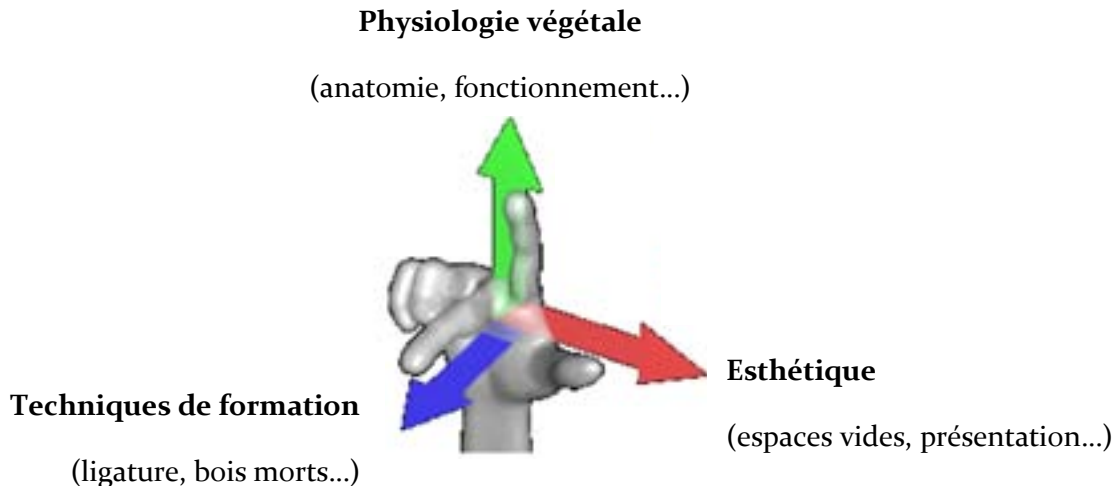
Les racines des plantes

Anatomie et fonctionnement

Bruno SIMON | Mémoire N3 | 1er janvier 2014

Introduction

La pratique du bonsaï doit se construire sur un triptyque :



Si l'esthétique vient au fil des ans (visites d'expositions, albums photos des expositions japonaises...), les techniques de formation des bonsaïs est ce qui est le plus enseigné, montré, jusqu'aux techniques les plus spectaculaires (torsions à la barre de fer, bois morts à la machine...), impressionnant les amateurs débutant.

En revanche, le fonctionnement du végétal est pour l'essentiel ignoré. Comment se forment et se développent les bourgeons ? Comment la sève parcourt-elle les arbres ? Quel rôle ont les feuilles et pourquoi se colorent-elles à l'automne ? Et les racines, comment poussent-elles ? Quel est leur rôle exactement ? Autant de sujets qui sont rarement abordés, ou de manière superficielle dans les formations.

Parce que le système racinaire est invisible, son importance est toujours sous-estimée. Pourtant, les racines des plantes vivaces peuvent se développer pendant plusieurs mois sans tige, tandis que rares sont les plantes (*Crassulaceae*, *Cactaceae*) dont les tiges peuvent survivre plus de quelques jours sans racines.

13 800 000 racines ont été un jour dénombrées sous un pied de seigle. Sous un pied de maïs, on a pu comptabiliser 10 à 30 kilomètres de racines. D'une manière générale, en fonction du type de sol, de plante, de conditions environnementales, ce sont entre 20 000 et 100 000 kilomètres de racines qui cheminent sous un hectare de sol.

Lors de la germination d'une graine, le premier organe observable est la radicule, ébauche de la première racine : comment se réalise la croissance de la racine et sa ramification ?

Quelle est l'organisation morphologique et anatomique des racines : comment se structure l'appareil racinaire ? Quels sont les tissus observables dans une racine ?

Un des rôles évident de l'appareil racinaire est l'ancrage de la plante dans le sol : comment l'architecture réagit-elle lors des transplantations, à la coupe des racines ?

Enfin, fort de ces connaissances, quelles applications l'amateur de bonsaïs peut-il trouver dans la pratique de son activité ?

J'ai volontairement réalisé un mémoire que certains estimeront trop scientifiquement, ardu, voire robotatif : chacun sera libre de le lire entièrement ou non. Le parti pris lors de la rédaction de mémoire peut être contesté : mon but est d'apporter des connaissances en physiologie des plantes, souvent ignorée dans notre activité.



Sommaire

Introduction.....	2
1. De la graine à la plantule : naissance des racines.....	6
2. Anatomie de la racine.....	7
2.1 La coiffe	8
2.2 Le méristème apical racinaire.....	11
2.3 La zone d'élongation	13
2.4 la zone de différenciation	15
2.4.1 <i>Le rhizoderme et les poils absorbants</i>	17
2.4.2 <i>Le parenchyme cortical</i>	19
2.4.3 <i>L'endoderme</i>	20
2.4.4 <i>Le péricycle</i>	21
2.4.5 <i>Le cylindre central (stèle) et les tissus conducteurs</i>	22
2.5 La zone de ramification	25
2.6 LA ZONE D'ÉPAISSEMENT SECONDAIRE.....	29
3. Quelques aspects de la physiologie racinaire.....	32
3.1 RESPIRATION.....	32
3.2 Croissance et ramification	33
3.3 ABSORPTION : MYCORHIZES ET NODOSITES.....	34
3.4 Excrétion.....	40
3.5 Synthèses	40
3.6 Mise en réserves	40
4. La morphologie du système racinaire.....	41
4.1 LES DIFFERENTS SYSTEMES RACINAIRES.....	41
4.2 CHEVELU ET CHARPENTE RACINAIRES.....	42
4.2.1 <i>Les racines ligneuses</i>	42
4.2.2 <i>Les racines fines</i>	42

4.3	RACINES SUPERFICIELLES ET RACINES PROFONDES	43
4.4	RACINES ET ANCRAGE	44
4.5	LES STADES DE DEVELOPPEMENT	45
4.6	INFLUENCE DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LE DEVELOPPEMENT DES RACINES....	47
5.	De la théorie à la pratique : application au bonsaï.....	50
5.1	Le prélèvement :.....	50
5.2	LE REMPOTAGE.....	51
5.2.1	<i>Les périodes appropriées :</i>	51
5.2.2	<i>Quel type de sols ?</i>	52
5.3	L'ENTRETIEN AU QUOTIDIEN.....	53
5.3.1	<i>L'ARROSAGE</i>	53
5.3.2	<i>LA FERTILISATION</i>	54
	Conclusion	55



1. De la graine à la plantule : naissance des racines

Que ce soit un gland de chêne tombé au milieu des feuilles en décomposition ou un petit pois semé dans le jardin, cette graine est chargée de renouveler son espèce. Elle est formée d'un germe, future plantule à l'état embryonnaire, et de « cotylédons », le tout enfermé dans une enveloppe. Les cotylédons ont un rôle de réserve (sucres sous forme d'amidon, huiles...), assurant le développement initial du germe. Après épuisement de ces réserves originelles, les racines prennent le relai. Comment se forme cette ou ces premières racines ?

Prenons le cas d'une germination de ce petit pois :



1-La « radicule » se développe en premier et constitue la racine principale.



2-Elle croît pendant que la « gemmule » donne la tige feuillée.



3-La racine principale grandit et des racines secondaires se développent



4-Après quelques temps, la racine principale est entourée d'une abondance de racines latérales.

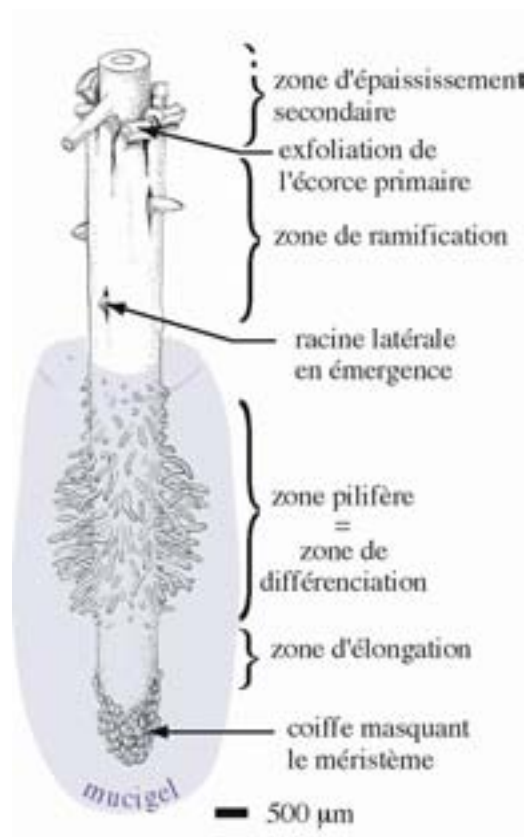
Ainsi « naît » notre plante : après la mise en place des premières racines, l'alimentation par le sol peut commencer et permettre la croissance du système aérien.

2. Anatomie de la racine.

Voici les différentes zones de chaque radicelle, en partant de l'extrémité :

- La coiffe
- Le méristème¹ apical² racinaire
- La zone d'élongation
- La zone pilifère (présence des poils absorbants)
- La zone de ramification, à partir de laquelle naissent les racines latérales
- La zone d'épaississement secondaire : les racines commencent à croître en diamètre et à brunir.

Le schéma ci-dessous illustre l'ensemble de ces zones :



Raven, O., Evert, R., Eichhorn, S., (2000). *Biologie végétale*. Paris : De Boeck

Nous allons décrire le rôle de chaque zone dans la vie de ces radicelles.

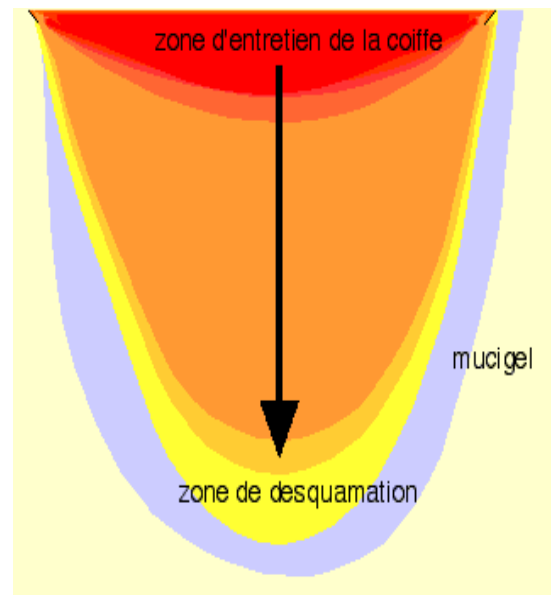
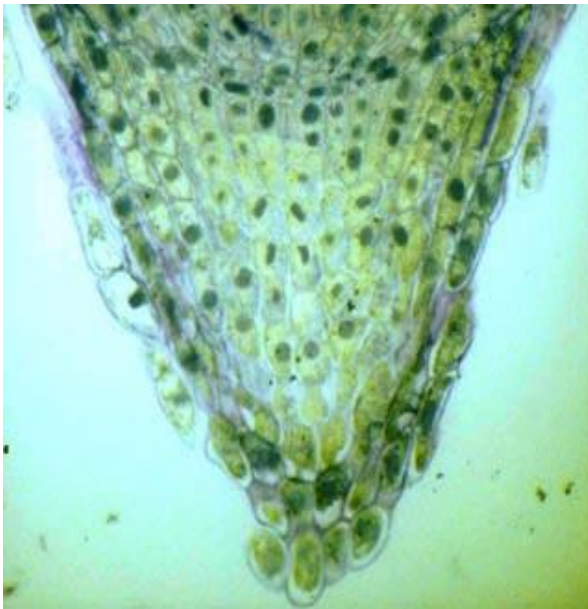
¹ Zone de cellules indifférenciées en division active et à l'origine de l'ensemble des tissus et des organes en croissance chez les végétaux. En substance, les **méristèmes** permettent aux plantes de croître.

² Apical : situé à l'**apex**, l'extrémité.

2.1 LA COIFFE

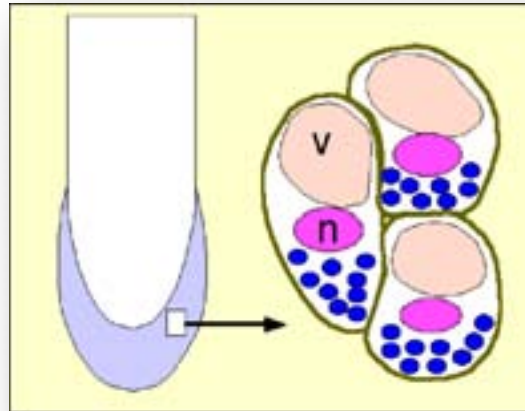
La coiffe, petite calotte qui entoure l'extrémité de la racine, a plusieurs rôles extrêmement importants:

- Elle protège le méristème apical où se déroulent les divisions cellulaires qui permettent la croissance de la racine. Lorsque la racine grandit, elle s'enfonce dans le sol dans un milieu hostile (dureté et irrégularité, graviers ou particules plus ou moins dures et tranchantes, etc.). La coiffe empêche ces particules de heurter brutalement la racine en mouvement.
- Elle est elle-même confrontée à ces heurts dangereux. Pour assurer sa fonction elle est sujette à un constant renouvellement. Des divisions cellulaires situées contre le méristème apical assurent le renouvellement de ses cellules pendant que les cellules apicales les plus externes se desquament progressivement. Malgré ce renouvellement continu, elle garde une forme et une taille constante.
- Les parois de ses cellules se transforment en un mucilage qui permet un glissement doux de la jeune racine.

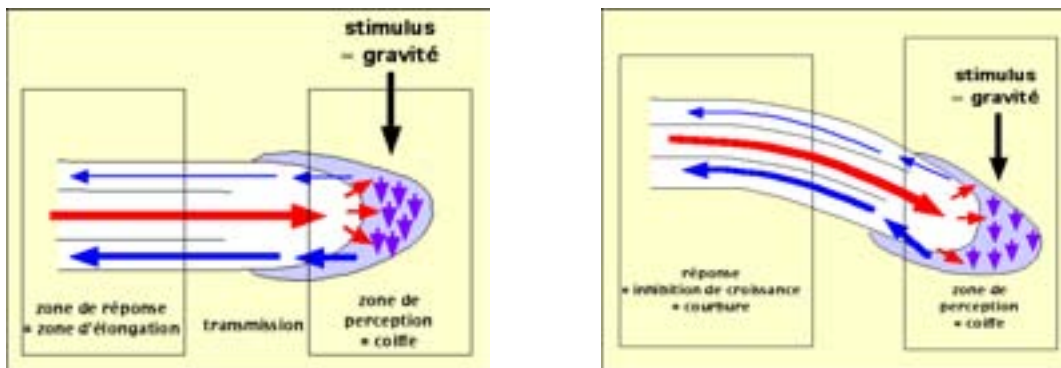


- Sa situation privilégiée à la pointe de la racine et dans l'axe de sa croissance l'amène à jouer un rôle majeur dans l'orientation de la croissance de la racine. C'est elle en effet qui représente le capteur de la gravité et qui permet de modifier le sens de croissance de la racine en fonction de sa position.

La racine réagit en effet à la gravité, phénomène appelé « gravitropisme positif » (c'est les termes à employer dans un dîner mondain entre amateurs de bonsaïs pour dire quelle croît plutôt vers le bas). Si nous observons au microscope les cellules de la partie centrale de la coiffe (la « columelle »), elles sont riches en amidon. A cause de leur densité, ces organites intracellulaires spécialisés dans le stockage de l'amidon (appelés « *amyloplastes* ») décanter dans ces cellules et se trouvent en bas quand la racine est verticale.

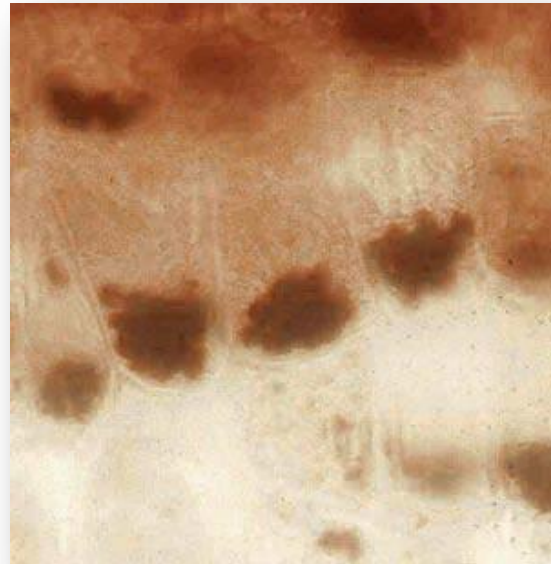
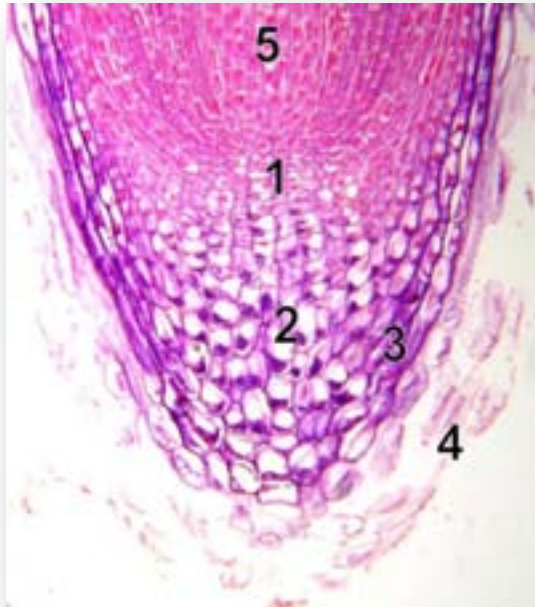


Lorsque la racine primaire est penchée ou placée en position horizontale, les amyloplastes³ changent de position à cause de la gravité. Ce sont les premiers éléments dont la position est modifiée par la gravité. C'est pourquoi ces amyloplastes ont été appelés des *statolithes*⁴ et les cellules qui les contiennent des *statocytes*. Leur intervention, comme récepteur primaire de la gravité, suggérée, dès le début du zoème siècle, a été démontrée.



³ Organites intracellulaires spécialisés dans le stockage de l'amidon

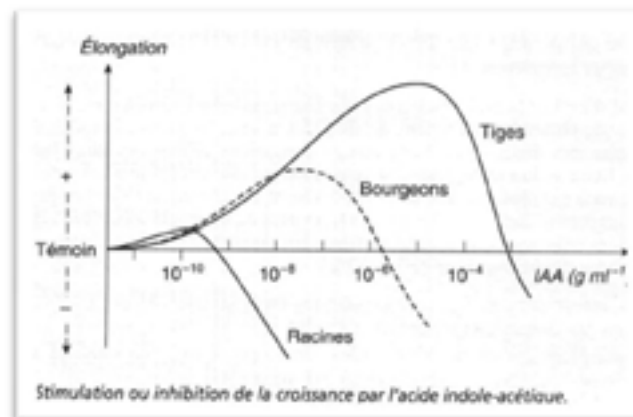
⁴ Du grec *statos* : stable, stationnaire et *lithos* : pierre



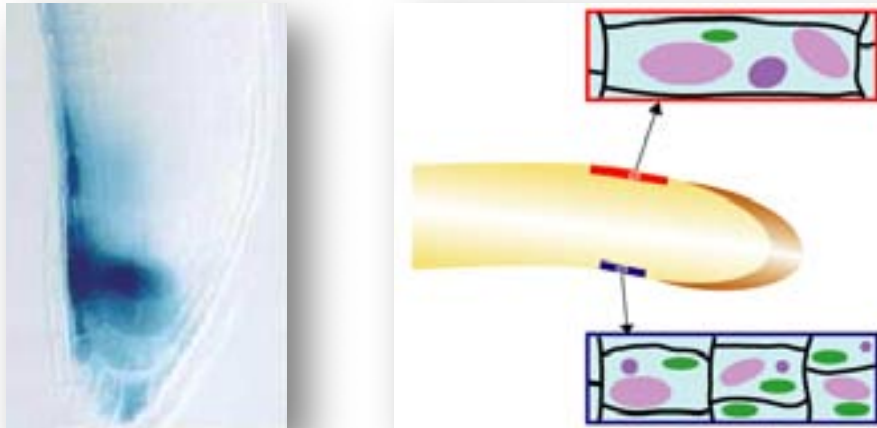
Pointe racinaire au microscope 100×.

1. méristème
2. columelle (statocytes avec statolithes)
3. partie latérale de la coiffe
4. cellules mortes arrachées
5. zone d'élongation

Il faut à ce stade aborder le rôle d'une substance particulière – l'auxine – qui est une hormone élaborée à l'extrémité des tiges (méristème apicaux des bourgeons) et transmise dans toute la plante, y compris les racines. En fonction de la concentration de cette hormone, celle-ci aura un rôle d'élongation cellulaire, d'organogénèse (formation de racines secondaires) ou d'inhibition.



Répartition de l'auxine dans la racine : une concentration modérée d'auxine provoque l'allongement des cellules correspondantes. En revanche, une trop forte concentration comme le montre la photo ci-dessous à gauche, conséquence des stimuli provoqués par les statolithes, inhibe cette elongation. L'effet cumulé des deux phénomènes (croissance pour les cellules de la face supérieure et stagnation pour celles de la face inférieure) provoque la courbure vers le sol.



Représentation schématique de l'allongement différentiel des cellules

Une substance de synthèse analogue à l'auxine est produite et est connue de nous tous sous le nom d'hormone de bouturage. **A la lumière des explications ci-dessus, on comprend pourquoi un excès de produit provoque l'effet inverse de celui espéré : l'inhibition et non la stimulation.**

2.2 LE MERISTEME APICAL RACINAIRE

La **zone de division cellulaire** comprend le méristème apical racinaire et les trois zones méristématiques qui en dérivent.

Qu'une racine soit longue ou courte, sa croissance, comme celle de la tige, commence par des divisions de cellules situées dans le méristème apical. Le méristème est une « fontaine de jeunesse » grâce à un petit groupe de cellules capables de se diviser, appelées « *initiales* ». Les initiales du méristème apical racinaire sont localisées dans une petite zone sphérique du méristème, d'environ 0,1 millimètre de diamètre, et se divisent très lentement (de l'ordre d'une division toutes les 180 heures seulement). Cette zone est appelée **centre quiescent** (du mot latin *quiescere*, se reposer).

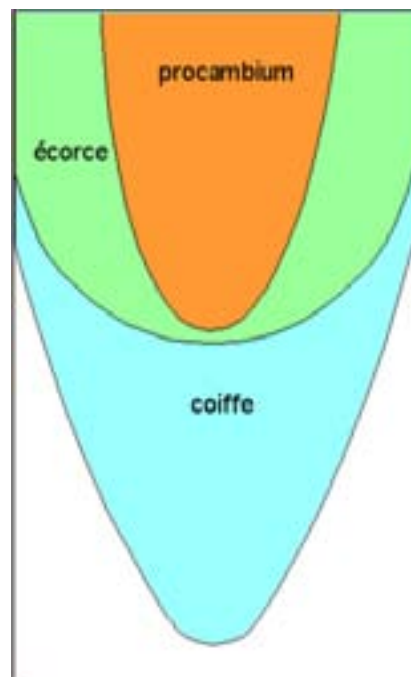
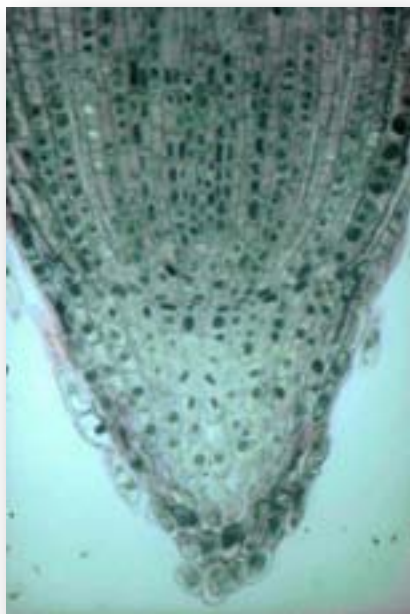
Quand une initiale se divise, une cellule fille reste dans le méristème apical, à l'état d'initiale, tandis que l'autre devient une dérivée qui est prête pour la croissance et la différenciation cellulaires. Si le méristème apical est endommagé ou détruit, quelques initiales et leurs dérivées sont capables d'en reconstruire un

autre. Chaque cellule du méristème apical racinaire semble avoir une « carte du développement » lui permettant de reconstruire l'ensemble de la structure.

De part et d'autre du centre quiescent, on distingue deux zones méristématiques aux devenir totalement différents.

Au-dessous du centre quiescent, la **zone d'entretien de la coiffe** est constituée de cellules aplaties, au cycle cellulaire très court, qui sont à l'origine de l'ensemble de la coiffe.

Au-dessus du centre quiescent, le **méristème apical** est constitué de cellules se divisant très fréquemment (2 fois par jour environ) et dont les dérivées sont à l'origine de l'ensemble des tissus racinaires.



2.3 LA ZONE D'ÉLONGATION

La **zone d'élongation** correspond à l'endroit où les cellules ne se divisent plus et commencent à s'allonger. Elles deviennent environ dix fois plus longues. Cette zone et la précédente se chevauchent légèrement car certaines cellules sont encore en train de se diviser alors que d'autres ont cessé et commencent à s'allonger.

La zone d'élongation est l'endroit où s'effectue la majeure partie de la croissance racinaire, permettant à la racine de s'enfoncer plus profondément dans le sol.

Après l'apparition de la radicule, il est intéressant de s'interroger sur le mode de développement de la racine. Pour ce faire, il y a l'expérience de Sachs qui permet de montrer que la croissance de toute racine se fait dans cette zone bien précise.

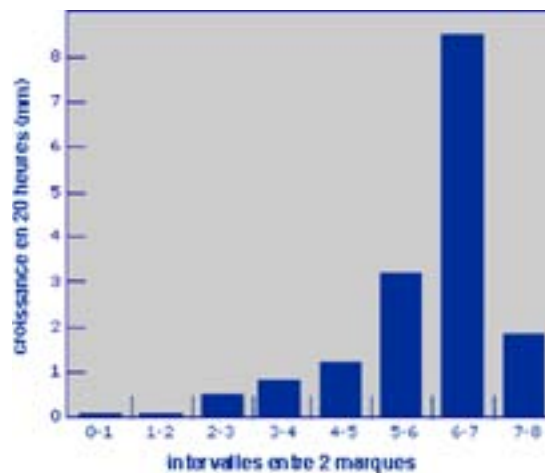
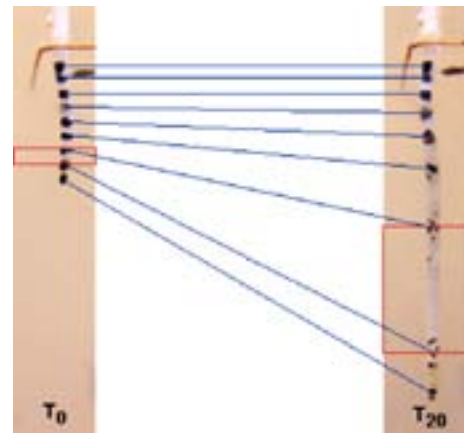
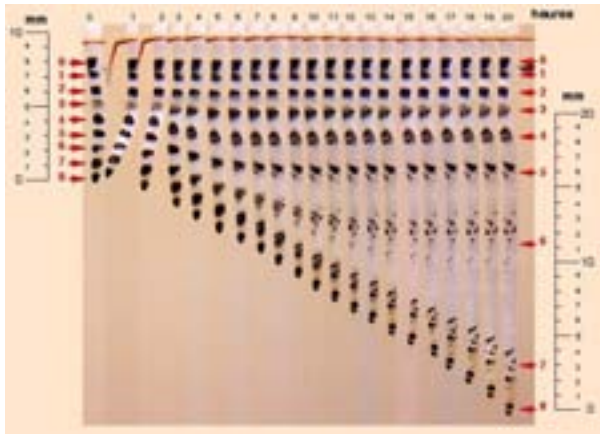
Avec un stylo à l'encre de chine, on gradue la racine d'une graine germée.



Dans l'expérience présente, une jeune racine de potimarron est marquée par des repères approximativement équidistants (1 mm).



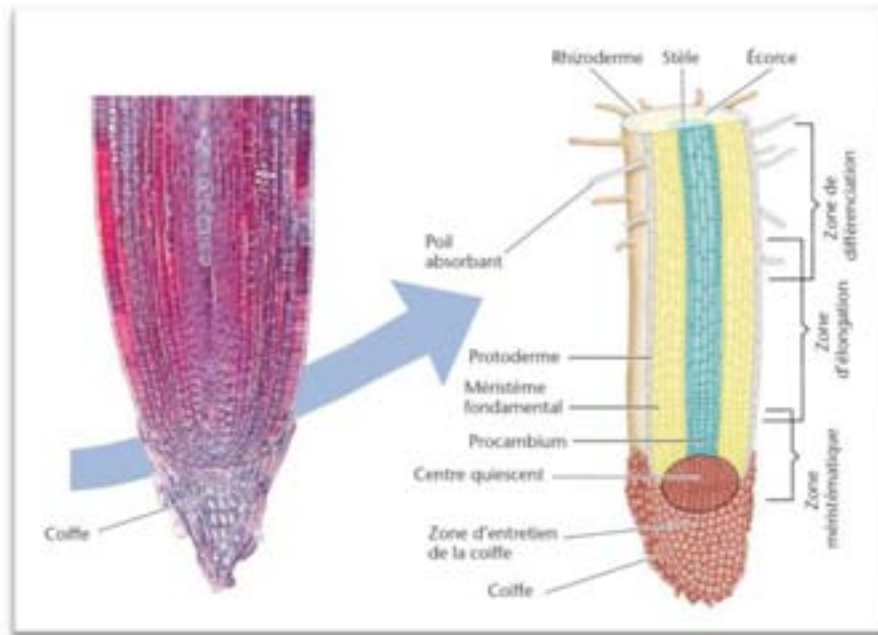
Elle est photographiée toutes les 15 minutes pendant 20 heures.



Cette expérience montre que la croissance de la racine est beaucoup plus importante dans la zone proche de l'extrémité de chaque radicelle. Ce phénomène est observable quelle que soit la plante, qu'elle soit jeune ou bien adulte comme les arbres : la croissance en longueur est l'apanage de l'extrémité de chaque petite racine.

2.4 LA ZONE DE DIFFERENCIATION

Après les étapes de division et d'élongation, les cellules vont se différencier, c'est-à-dire se modifier structuralement en se spécialisant physiologiquement.



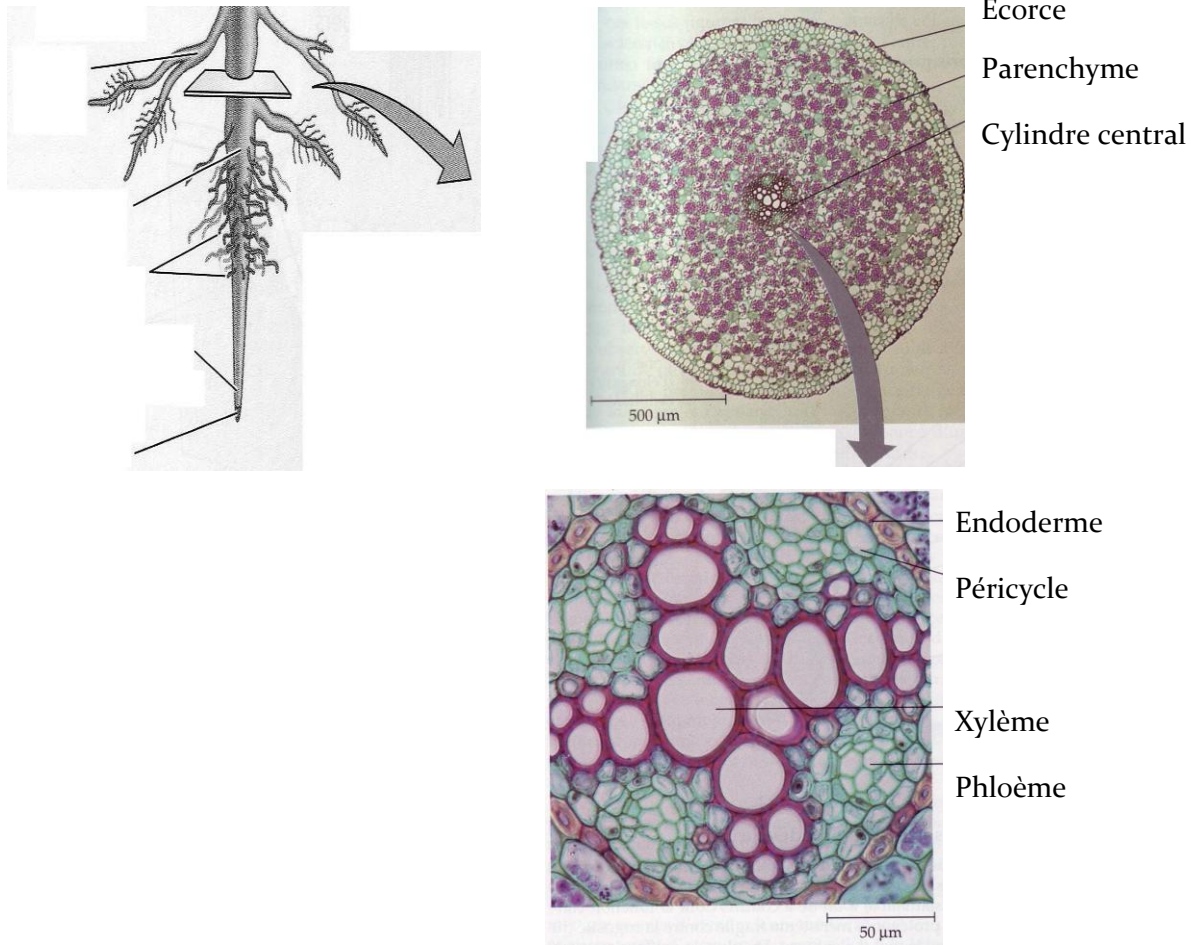
Dans un organe aussi simple que la racine, les cellules, selon leur position par rapport à l'axe, les caractéristiques du tissu méristématique (procambium, méristème de coiffe) dont elles sont issues et leur proximité vis-à-vis du milieu extérieur, vont se spécialiser différemment.

On peut séparer artificiellement certains types cellulaires :

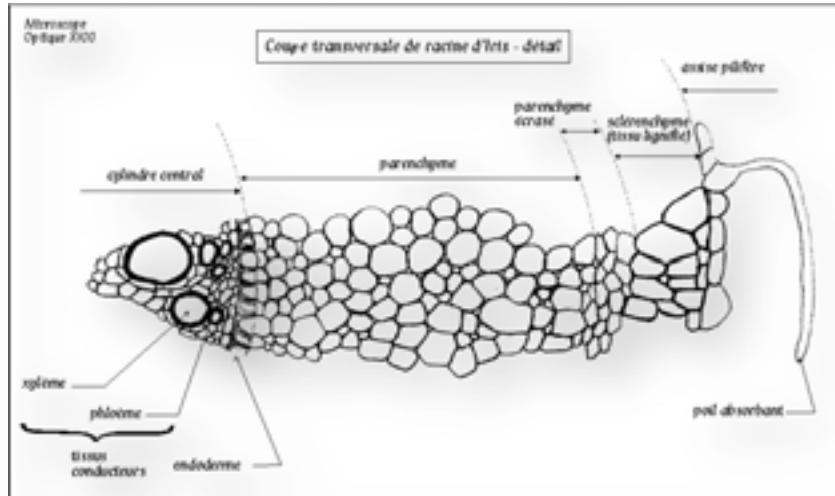
- **Les cellules de surface** (rhizoderme pour les auteurs français, épiderme dans les ouvrages anglo-saxons) : elles vont se différencier en cellules protectrices vis à vis du milieu extérieur et pour certaines d'entre elles en cellules absorbantes (**poils absorbants**). Le rhizoderme est aussi appelé assise pilifère.
- **Les cellules de l'écorce** : elles vont se différencier en cellules de **parenchyme cortical** qui jouera un rôle important dans **l'accumulation de réserves**. Certaines d'entre elles (les plus profondes : **l'endoderme**) joueront un rôle clé dans le **transfert de substances**.
- **Les cellules du procambium** : elles vont se différencier en partie
 - en **cellules conductrices** (sève) :
 - tubes criblés conducteurs de la sève élaborée -**le phloème**-
 - trachéides et vaisseaux, conducteurs de la sève brute -**le xylème**-
 - en cellules dit d'accompagnement
 - et en cellules maintenues avec un fort pouvoir méristématique -**le péricycle**-. Dans ce dernier cas, cette absence de différenciation ou différenciation retardée permettra la

formation de racines secondaires (organogenèse) ou la réalisation de cambium⁵ et donc la formation de tissus conducteurs secondaires.

Les botanistes étudient la structure des organes des végétaux en effectuant des coupes de ces organes selon différents plans et en les examinant au microscope. Une coupe effectuée perpendiculairement à l'axe le plus long de l'organe est appelée **coupe transversale**. L'étude par les botanistes des tissus constituant l'organisme végétal, ou anatomie, a permis de préciser la disposition typique des tissus conducteurs et des tissus fondamentaux chez de nombreuses plantes vasculaires.



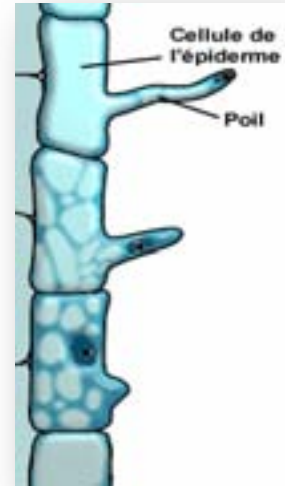
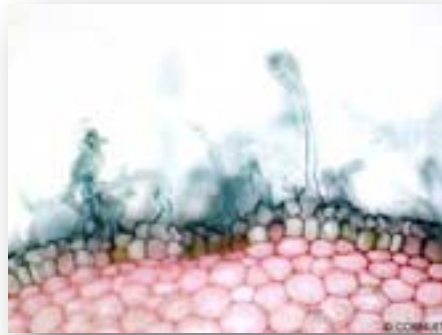
⁵ Cambium : couche unicellulaire située entre le bois et l'écorce et qui accroît la substance de l'écorce et du bois. *Le cambium est à l'origine des fibres et des vaisseaux du bois, mais aussi du liber, tissu dans lequel circule la sève élaborée.* — (Stéphane SIGNOLLET, *Le houx*, Actes Sud, Le nom de l'arbre)



2.4.1 Le rhizoderme et les poils absorbants

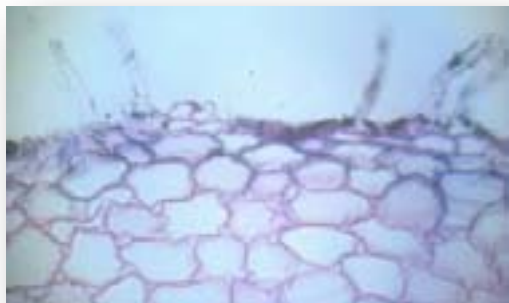


Dans les racines jeunes, les poils absorbants, comme leur nom l'indique, représentent le lieu principal d'absorption de l'eau et des sels minéraux par les racines. Ceci est bien compréhensible quand on imagine l'énorme surface de contact de ces innombrables cellules avec le milieu. Certains arbres comptent plusieurs millions de poils absorbants, totalisant 10 à 50 kilomètres de longueur ! Ces poils se situent dans le dernier ou les deux derniers centimètres de la racine et sont constitués chacun d'une cellule unique différenciée à partir d'une cellule du rhizoderme.



Leur croissance est très rapide mais leur durée de vie est courte (de quelques jours à quelques semaines). Au fur et à mesure que la racine s'allonge, les anciens poils absorbants meurent tandis que de nouveaux se mettent en place dans la zone de différenciation.

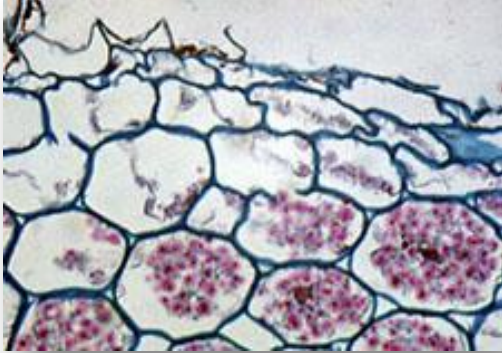
L'essentiel de l'absorption de l'eau et des sels minéraux se fait *via* les poils absorbants, y compris pour les racines les plus volumineuses. Ces extensions outre le rôle d'absorption ont aussi une fonction d'ancrage au sol, servant de point d'appui pour la croissance racinaire.



Cette racine a poussé dans des conditions naturelles comme le montre la présence de particules de terre accrochées aux poils.

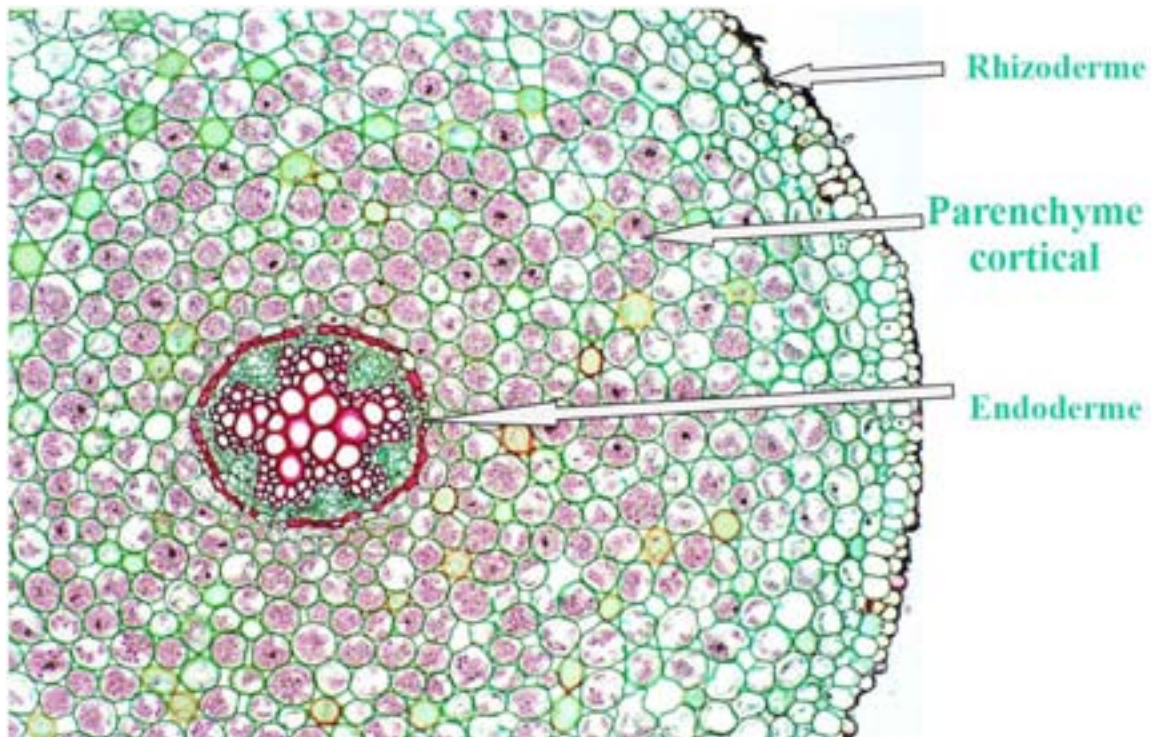
2.4.2 Le parenchyme cortical

Dans la racine, le *parenchyme*⁶ cortical transporte l'eau captée vers le centre de la racine. Le parenchyme médullaire situé au centre agit comme un tampon avant que l'eau ne remonte dans la tige.



Ci-contre : à l'extérieur, le rhizoderme exfolié en partie passe directement à un parenchyme cortical bourré de réserves, amyloplastes probablement.

Ci-dessous : les nombreuses réserves des cellules du parenchyme.

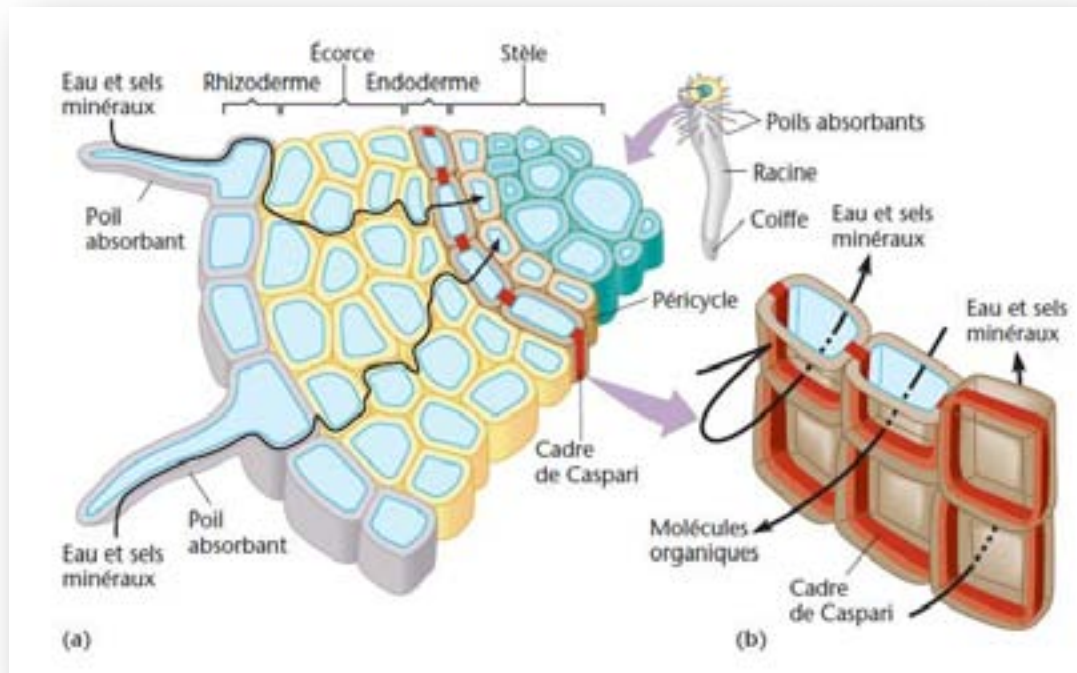


⁶ Parenchyme : tissu tendre et spongieux des feuilles, des tiges et des fruits.

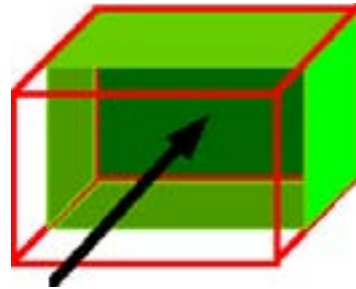
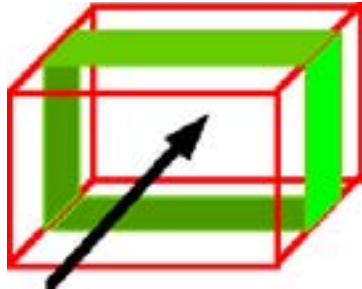
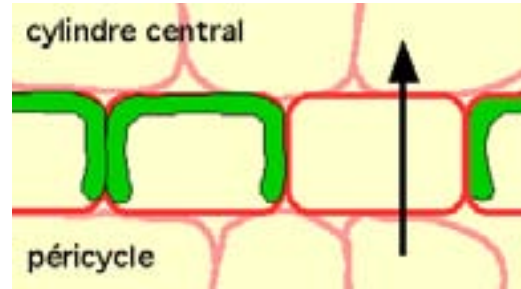
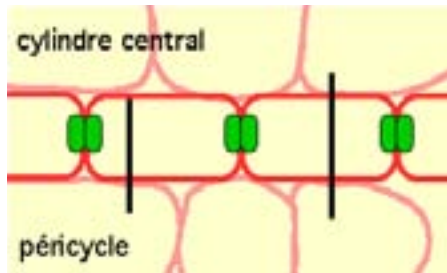
2.4.3 L'endoderme

L'endoderme, assise cellulaire la plus profonde de l'écorce de la racine, sépare physiquement l'écorce et le cylindre central. Par sa position et ses caractères cellulaires, il joue un rôle fondamental dans le transit de l'eau et des sels minéraux au niveau de la zone d'absorption des racines jeunes.

La fonction de l'**endoderme** est de réguler le flux de substances entre l'écorce et les tissus conducteurs. L'endoderme est l'assise la plus interne de l'écorce et constitue une seule assise formée de cellules étroitement jointives entourant le péricycle. Les parois tangentielles externes et internes de ces cellules sont cellulósiques, tandis que les autres possèdent une bande imprégnée de subérine, voire de lignine, appelée **cadre de Caspari**, totalement... imperméable ! Ainsi, le cadre de Caspari oblige l'eau et les sels minéraux qui, jusqu'alors se déplaçaient entre les cellules (voie dite apoplasmique), à traverser les cellules endodermiques (voie symplasmique). Dans cette optique, les parois des cellules endodermiques contrôlent les éléments minéraux qui se déplacent dans le sens radial, de l'écorce vers les tissus conducteurs. Mais l'endoderme régule également le reflux d'eau et d'éléments minéraux vers l'extérieur (osmose).



Dans une jeune racine en pleine croissance, les premières cellules endodermiques, avec leur cadre de Caspari, peuvent être observées dans la zone des poils absorbants où, comme nous l'avons vu, se réalise l'essentiel de l'absorption de l'eau et des sels minéraux.



Endoderme de Dicotylédones vu en coupe transversale et de face. Le transit de l'eau et des substances dissoutes ne peut se réaliser qu'à travers les cellules.

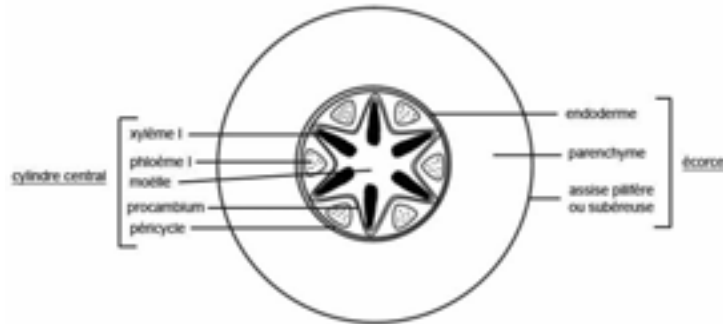
Endoderme de Monocotylédones vu en coupe transversale et de face. Le transit de l'eau et des substances dissoutes ne peut se réaliser qu'à travers certaines cellules dépourvues d'épaississement lignifié.

2.4.4 Le péricycle

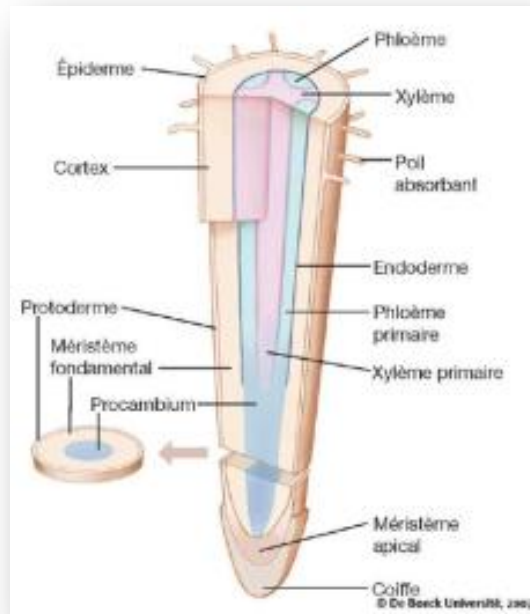
Le **péricycle** correspond à l'assise la plus externe du cylindre central (voir page suivante). Il est formé de cellules qui, après dédifférenciation, donnent des racines latérales. La naissance de ces racines secondaires sera abordée un peu plus loin.

2.4.5 Le cylindre central (stèle) et les tissus conducteurs

Le cylindre central d'une racine (ou d'une tige), qui est entouré par l'écorce, est connu sous le nom de **stèle** (du grec *stèle*, pilier ou colonne).

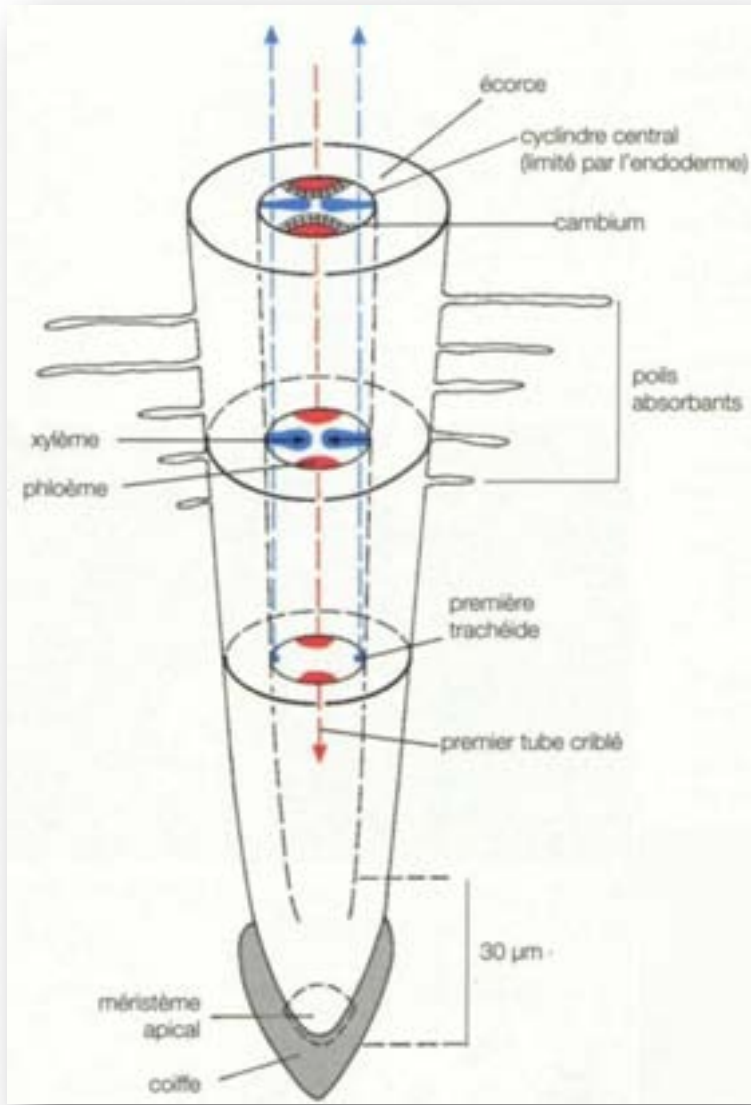


Il est important de voir comment ces tissus conducteurs (**xylème**⁷ et **phloème**⁸) se mettent en place dans chacune des radicules. Lors du paragraphe sur la coiffe, nous avons vu qu'elle abritait le méristème apical racinaire. Celui-ci va d'abord générer : à l'extérieur, le protoderme qui deviendra le rhizoderme ; ensuite le méristème fondamental puis au centre le procambium à l'origine des premiers tissus conducteurs (phloème et xylème primaires).



⁷ **Xylème** : Tissu conducteur des plantes, qui conduit la sève brute des racines vers les feuilles et qui constitue entre autres le bois des arbres.

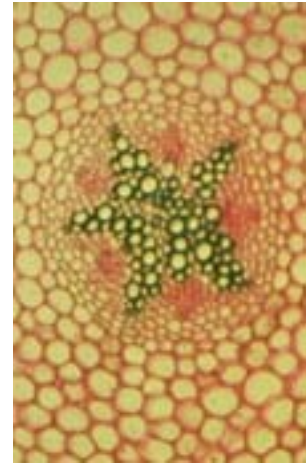
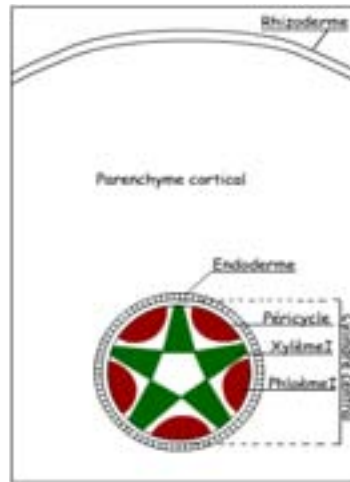
⁸ **Phloème** : Tissu végétal conducteur de la sève élaborée, constituant la partie la plus interne de l'écorce chez les arbres.



Les racines de Dicotylédones possèdent de 2 à 5 faisceaux de xylème primaire alors que les racines de Monocotylédones en présentent plus de 6 et souvent 12 à 20. La différenciation des tissus conducteurs se réalise dans le procambium, situé dans le cylindre central et délimité par le péricycle et l'endoderme. Comparons l'anatomie de deux racines de plantes herbacées : une dicotylédone, l'hellébore (Renonculacées) et une monocotylédone, l'Iris (Iridacées).

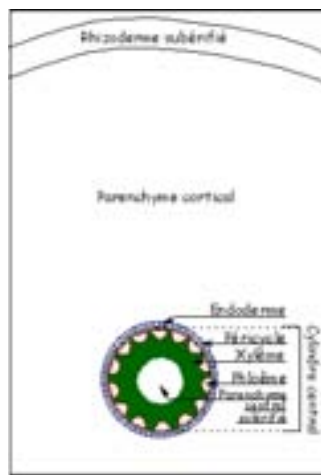
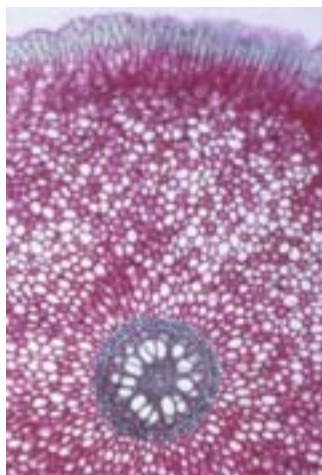
Structure d'une racine de Dicotylédones, l'Hellébore (Renonculacées)

En coupe transversale, une racine est composée d'une région externe, l'écorce (rhizoderme, parenchyme cortical et endoderme) et d'une région centrale, le cylindre central limité par une assise de cellules, le péricycle. Ce cylindre contient les tissus conducteurs, le xylème (conducteur de la sève brute, ascendante) et le phloème (conducteur de la sève élaborée par les feuilles, descendante) disposés en faisceaux. Chez les dicotylédones, il existe de deux à cinq faisceaux de chaque type disposés en alternance.



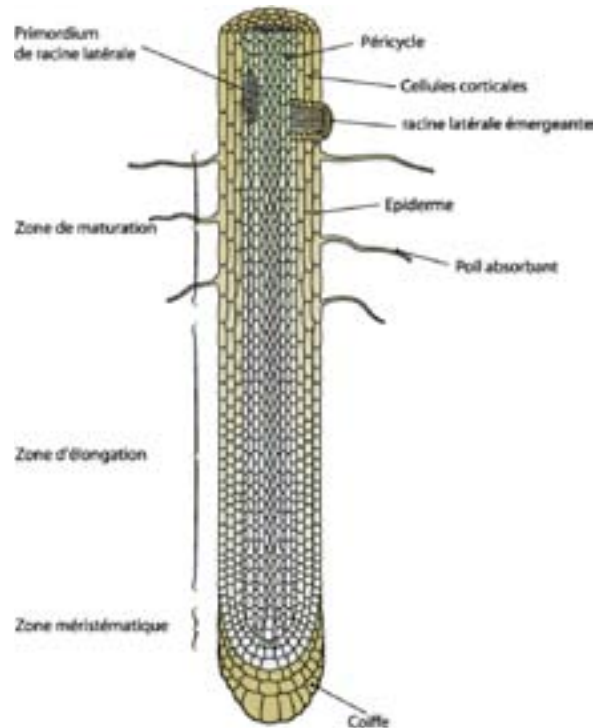
Structure d'une racine de Monocotylédones, l'iris (Iridacées).

La structure est sensiblement la même mais les faisceaux sont plus nombreux. Ici, cette racine en comporte 14.

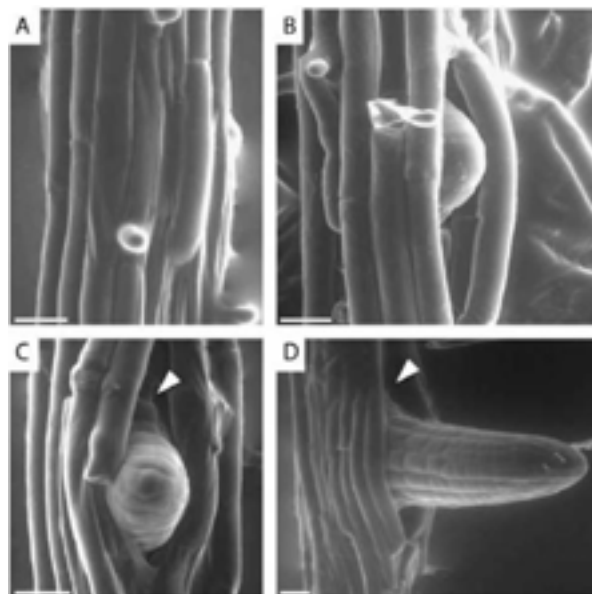


2.5 LA ZONE DE RAMIFICATION

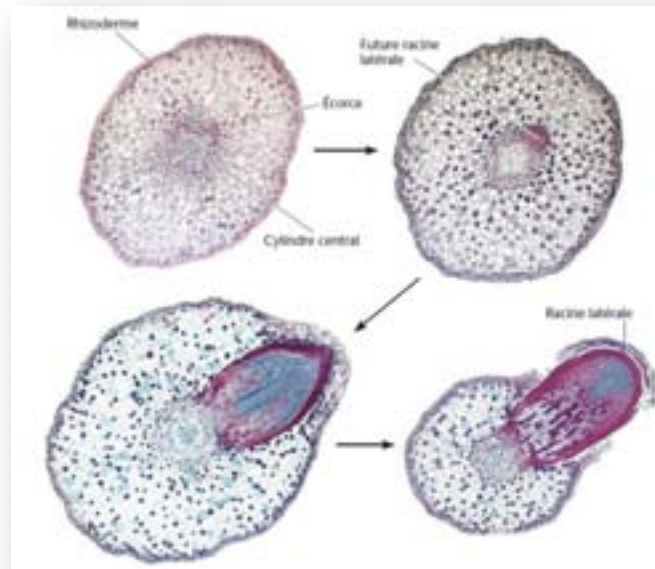
Au dessus de la zone de différenciation, se trouve la zone de ramification, lieu d'émergence des racines latérales.



Comme ces racines latérales (ou racines secondaires) proviennent du péricycle (voir pages précédentes), on dit qu'elles ont une origine profonde. Elles doivent traverser l'écorce et le rhizoderme avant d'émerger à l'extérieur, désorganisant ainsi localement les tissus traversés. Les tissus conducteurs de chaque racine latérale sont en continuité avec ceux de la racine d'origine et ont la même organisation anatomique.



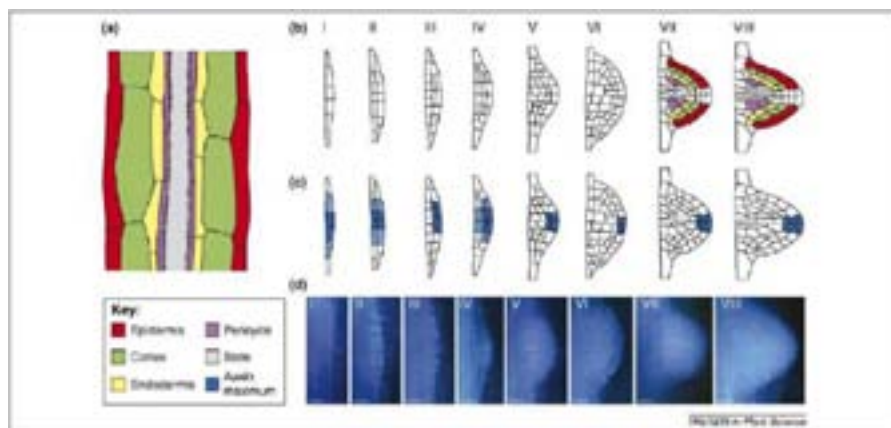
Formation d'une racine latérale.



Cette série de coupes transversales montre le développement d'une racine latérale chez le saule. La racine principale est coupée transversalement tandis que la racine latérale est sectionnée longitudinalement.

Chez les Dicotylédones (et chez les Gymnospermes), la formation de racines secondaires se réalise au dessus de la zone de différenciation, lorsqu'un appareil conducteur fonctionnel est développé. L'initiation d'un nouveau méristème radiculaire est endogène. Il débute par la reprise de divisions cellulaires **dans le péricycle**, en face des pôles vasculaires.

La division des cellules du péricycle aboutit à un massif méristématique qui s'organise rapidement en méristème apical. Sa croissance se réalise par extrusion au travers des tissus corticaux de la racine. La jeune racine fait ensuite saillie à l'extérieur. Sa structure est alors tout à fait conforme à celle de la racine principale.





Mise en place d'un bourgeon racinaire au niveau du péricycle en face d'un faisceau de xylème.

On observe l'interface entre la nouvelle racine et le parenchyme cortical traversé.



La jeune racine secondaire est complètement sortie de la racine principale au travers du parenchyme cortical et du rhizoderme déchirés.

On reconnaît les territoires caractéristiques d'une jeune racine, en particulier le méristème subapical et la coiffe.

Dès que la jeune racine est formée, elle présente comme la racine principale, une zone de division, une zone d'élongation et une zone de différenciation. A ce niveau, les cellules de son procambium se différencient en tissus conducteurs de la même manière que dans la racine mère. Comme la jeune racine a été initiée près d'un pôle vasculaire, la jonction entre ses faisceaux conducteurs et ceux de la racine mère s'effectue sans problème.



Raccordement des tissus vasculaires (en vert) de la jeune racine avec ceux de la racine mère.

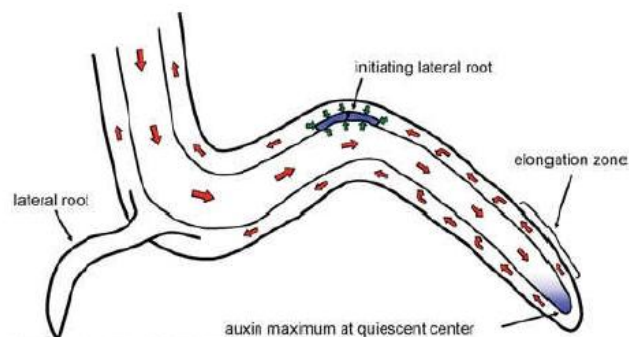
Une fois la jeune racine secondaire formée, elle se développera exactement comme la racine mère sauf pour une caractéristique, son orientation par rapport à la pesanteur. La plupart des racines secondaires auront un gravitropisme intermédiaire entre le gravitropisme positif des racines principales et le gravitropisme négatif des tiges. Cette caractéristique leur permettra de croître dans une direction privilégiée.



Trois étapes de la croissance de racines secondaires à partir de la racine principale d'une germination de Potimarron.

Toutes les racines croissent avec un angle constant très précis.

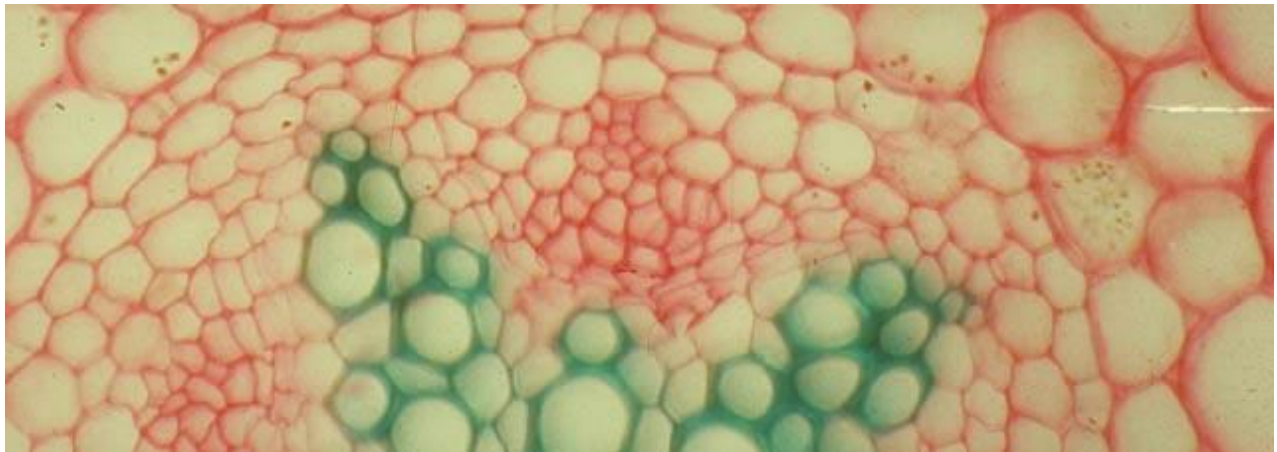
Les courbures de la racine provoquent une concentration d'auxine, engendrant à cet endroit la naissance d'une racine secondaire.



2.6 LA ZONE D'ÉPAISSEMENT SECONDAIRE

C'est à partir de cette zone que la racine va croître en diamètre, avec la mise en place d'une structure dite secondaire.

Cette structure ne se met en place que chez les plantes pluriannuelles : un cambium continu, circulaire qui va former les tissus de conduction secondaires que sont le xylème II et le phloème II. Le processus est d'ailleurs le même pour la tige.



Dans cette section d'une jeune racine d'hellébore (Renonculacées), on observe des divisions cellulaires tangentiels à la surface entre les faisceaux de phloème et les côtés des faisceaux de xylème. Ce nouveau cambium forme des arcs qui pourront se réunir au niveau des pôles de xylème.

Comment la racine va passer d'une structure primaire à une structure secondaire ?

Dans le cas des racines très âgées, il n'est en général plus possible de reconnaître les caractéristiques histologiques de la racine et de la distinguer de la structure d'une tige.

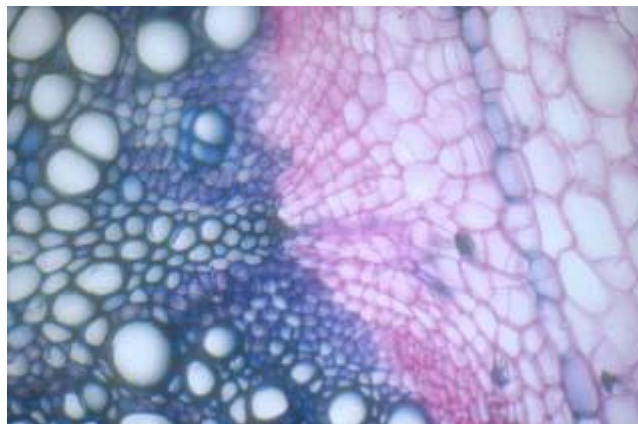
Voici les trois étapes de la formation de tissus conducteurs secondaires dans une racine à trois pôles vasculaires (xylème et phloème) :



- Le cylindre central à tissus exclusivement primaires (xylème en vert, phloème en rouge pointillé, reste du procambium en bleu).
- un cambium libéro-ligneux (bleu foncé) se différencie dans le procambium entre le phloème et les côtés des faisceaux de xylème. Il donne du phloème secondaire ou liber (rouge foncé) sur sa face externe et du xylème secondaire ou bois (bleu foncé) sur sa face interne.
- le xylème secondaire, le cambium et le phloème secondaire forment trois anneaux concentriques continus. Par suite de la croissance en épaisseur des tissus secondaires, le phloème primaire est rejeté à la périphérie et écrasé contre le péricycle.

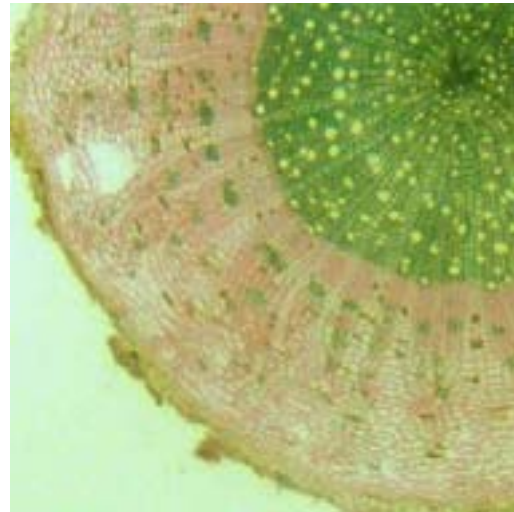
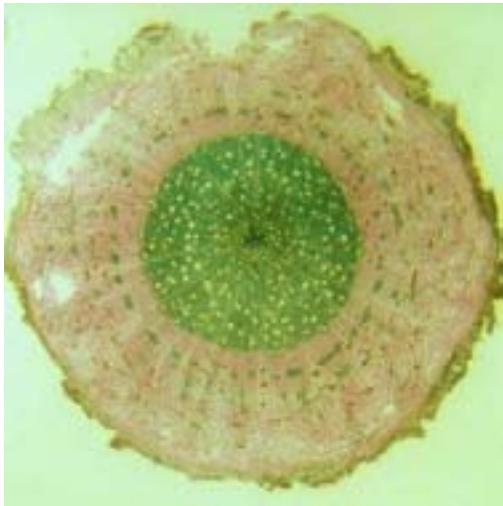
Détail au niveau d'un pôle de xylème primaire.

Les divisions cellulaires du cambium au niveau du pôle de xylème primaire vont permettre la formation d'un anneau continu. L'endoderme est encore bien visible

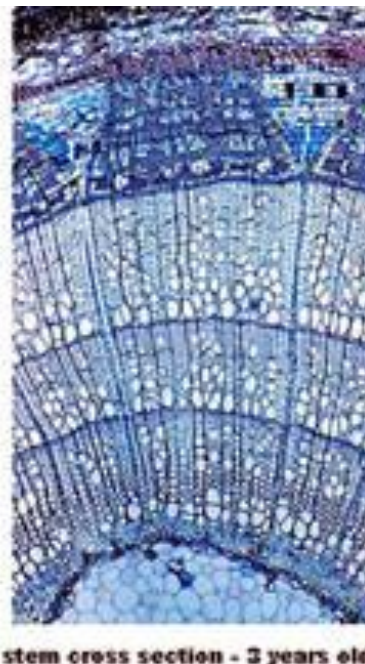
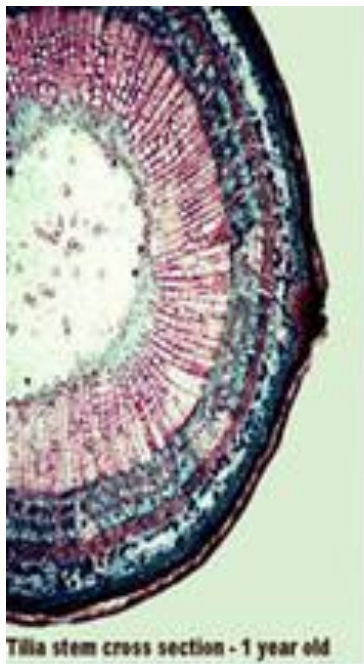


Coupe transversale d'une racine de sureau d'un an.

Le xylème secondaire ou bois forme un cylindre compact dans lequel on observe des vaisseaux de grande taille dispersés entre des cellules plus petites (fibres). Le xylème primaire au centre est peu visible. Autour du bois, on observe un anneau de phloème secondaire ou liber qui s'éclate à la périphérie par suite de la croissance des tissus internes. La racine est entourée d'une zone protectrice, le liège ou suber qui remplace le parenchyme cortical et le rhizoderme.



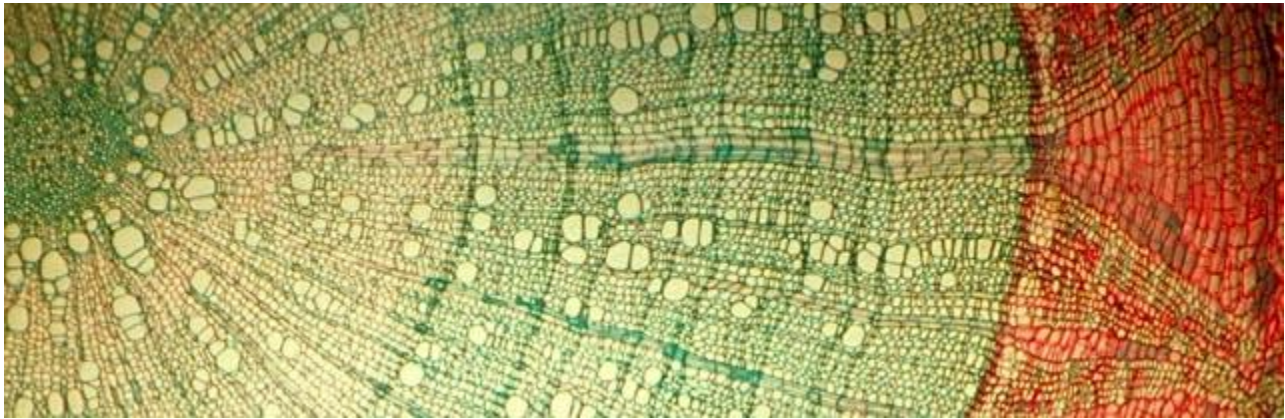
Coupe transversale d'une racine de tilleul de 1, 2 puis 3 ans.



1 : Racine tilleul 1 an. 2 : Racine tilleul 2 ans. 3 : Racine tilleul 3 ans.

Coupe transversale d'une racine de tilleul de 7-9 ans.

On reconnaît les cernes de bois, au centre et le liber plus ou moins éclaté, à droite. Il est impossible de préciser l'organisation du xylème primaire, à gauche.



3. Quelques aspects de la physiologie racinaire

3.1 RESPIRATION

La respiration conditionne toutes les autres fonctions. L'approvisionnement en oxygène ne se fait pas à travers la partie aérienne, mais par absorption directe dans l'air contenu dans la porosité du sol. En dessous de 15% d'oxygène, l'absorption minérale décroît.

En dessous de 12%, il n'y a plus d'initiation de nouvelles racines. En-dessous de 5%, il n'y a plus de croissance racinaire. En-dessous de 1% les racines perdent du poids et meurent.

Le maintien d'une forte microporosité générale et la constitution d'une macroporosité verticale réapprovisionnant les horizons profonds, sont les garants d'un bon développement racinaire ; la profondeur limite d'enracinement est généralement déterminée par le taux d'oxygène dans le sol.

Citons le cas des **pneumatophores**, ou racines aérifères : ce sont des racines qui croissent ... vers le haut ! Elles sortent des sols asphyxiques où la concentration en oxygène dissous dans l'eau est très faible. Les arbres de la mangrove, le palétuvier blanc (*Avicennia*) par exemple, produisent des pneumatophores qui émergent de la vase salée. Les cyprès chauves des Everglades américains (*Taxodium distichum*) produisent des pneumatophores qui se dressent jusqu'à un mètre au dessus du marais, puis se coudent et redescendent dans l'eau.



3.2 CROISSANCE ET RAMIFICATION

Nous avons vu l'influence de l'oxygène sur la croissance. L'effet de la température sur la croissance varie en fonction de l'espèce, le zéro de croissance allant de 4 ou 5° pour le prunier (*Prunus*) à 16-18° pour l'oranger (*Citrus*).

Une baisse de l'humidité du sol, même passagère, près du point de flétrissement, suffit pour arrêter la croissance de façon durable et orienter la morphogenèse racinaire vers la croissance secondaire (en épaisseur). Il faut donc maintenir un taux d'humidité suffisant pendant les années suivant la plantation sur les arbres plantés en pleine terre pour favoriser l'extension des racines. Pour les bonsaïs, nous savons tous que la seule chose à ne pas oublier, c'est l'arrosage : les racines n'allant pas chercher l'eau profondément comme un arbre dans la nature, l'évapo-transpiration des feuilles épuise notre arbre jusqu'à la mort.

La carence comme l'excès en azote ralentissent la croissance racinaire. Phosphore et potassium favorisent la division racinaire.

Le diamètre des nouvelles racines est déterminé dès leur initiation. Il semble dépendre de l'approvisionnement en oxygène et en glucides des méristèmes qui leur donnent naissance.

La texture et la structure du sol interviennent également. En sols sableux, les racines sont rectilignes et se ramifient peu. En sols argileux, elles sont sinueuses et ramifiées. L'humidité, la matière organique et

notamment la tourbe sont des facteurs de ramification intense. La croissance racinaire est stoppée dans l'air : les sols lacuneux sont défavorables à la croissance racinaire. Une légère compaction par tassement puis par arrosage est nécessaire à la plantation.

3.3 ABSORPTION : MYCORHIZES ET NODOSITES

Les racines forment fréquemment des associations avec d'autres organismes, appelées **symbioses**. Ces types d'associations sont bénéfiques pour les deux participants.

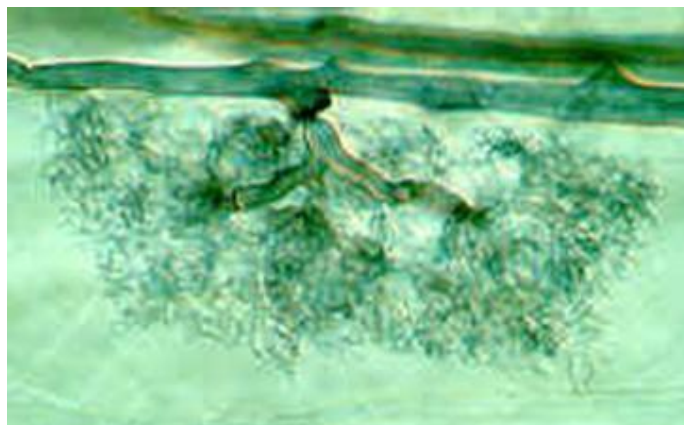
L'absorption dépend du taux d'oxygène, de l'humidité et de la température du sol. La racine épuise le sol dans son environnement immédiat beaucoup plus vite que la capacité de réapprovisionnement par migration des ions. La racine étend sa zone d'exploration par croissance, mais surtout grâce aux champignons mycorhiziens qui multiplient par cent, voire par mille, la surface d'échange avec le sol.

Le champignon se nourrit des hydrates de carbone fournis par la racine, et lui apporte en retour eau et sels minéraux. La mycorhization est efficace surtout en sols pauvres et secs, elle peut être inhibée ou détruite par excès de fertilisation.

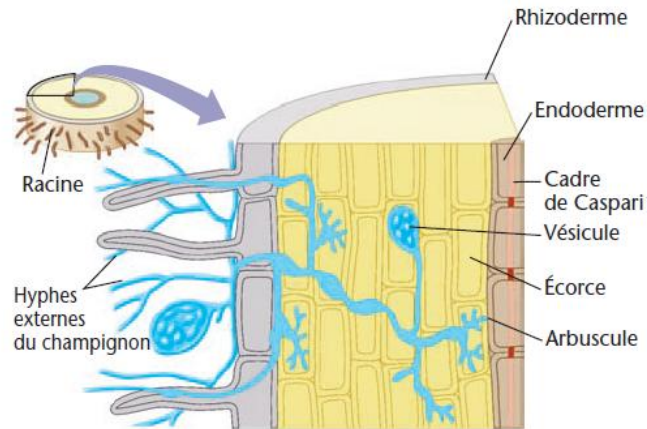
Les **mycorhizes** (du grec *mykes*, champignon, et *rhiza*, racine) sont des symbioses entre les racines des plantes vasculaires et des champignons du sol. Les racines de plus de 80 % des espèces végétales sont mycorhizées. Les deux principales associations mycorhiziennes sont les endomycorhizes et les ectomycorhizes.

Chez les **endomycorhizes**, le champignon pénètre dans la racine, traverse la paroi des cellules corticales et produit des digitations appelées *arbuscules*. Ces arbuscules repoussent la membrane plasmique des cellules corticales et peuvent ainsi absorber des nutriments.

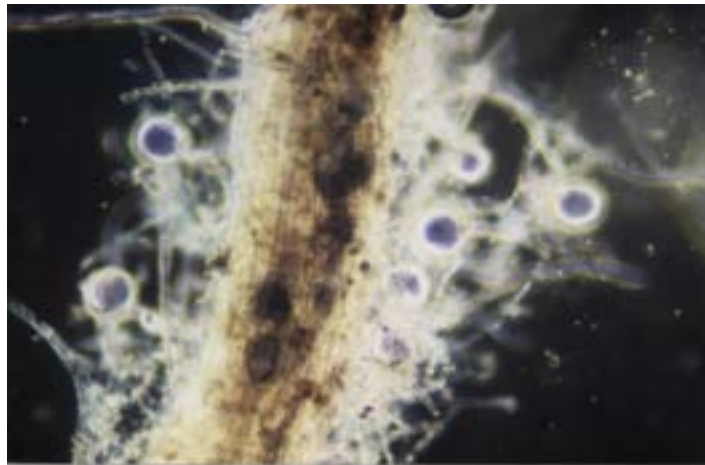
Les endomycorhizes dites vésiculo-arbusculaires sont les mycorhizes les plus importantes et contribuent pour une augmentation nette de la photosynthèse de 5 à 20. Les espèces à endomycorhizes forment des racines fines qui présentent une ramification équilibrée et diffuse, la plupart des axes pouvant continuer à s'allonger et rester non subérisés sur plusieurs centimètres



Bien qu'intracellulaire, l'hyphe ne pénètre pas le cytoplasme de la cellule. il se met en place une zone d'échange:



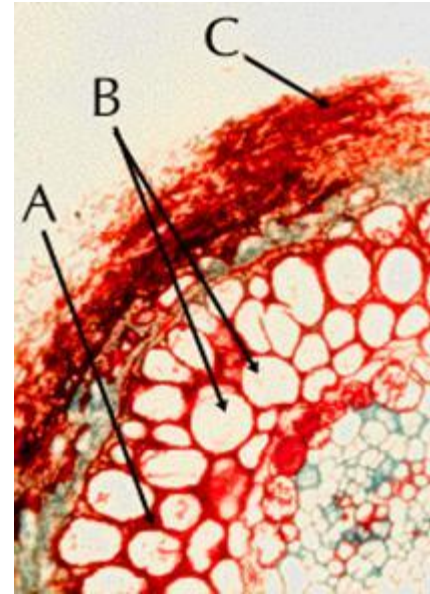
Les endomycorhizes pénètrent dans l'écorce de la racine.



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



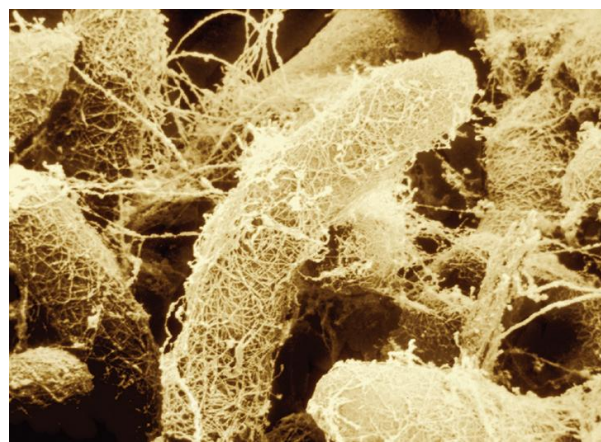
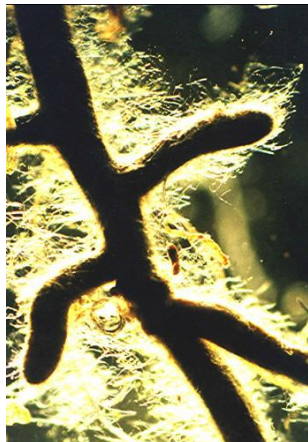
les hyphes du champignon
(en rouge A) entourent les cellules de la
racine (B) pour former le réseau de Hartig
et entourent la racine pour former le
manteau (C)

Les arbres ectomycorhizés représentent seulement 3% des espèces de plantes, mais ces arbres sont ceux des forêts des zones boréales, tempérées et tropicales et sont donc des partenaires majeurs dans le cycle global du carbone. Les champignons responsables sont divers: environ 5000 espèces. Ceux-ci ont souvent un spectre d'hôte restreint. Dans la plupart des cas, le champignon a besoin de cette association pour fructifier. On estime que le champignon permet l'exploration d'un volume de sol 1000 fois plus important que les racines seules (pour 1 mètre de racine, un kilomètre de filaments mycorhiziens!). Dans certains cas, la totalité des racines est mycorhizée et donc la totalité des nutriments absorbés par l'arbre passe par les champignons, l'arbre est donc complètement isolé de son support!

Les racines des essences à ectomycorhizes présentent un développement hiérarchisé, avec des racines longues qui s'allongent et comportent à leur extrémité une coiffe et des poils absorbants comme vu ci-dessus, mais aussi de nombreuses racines courtes réparties le long des racines longues. Ces racines courtes, rapidement subérisées, sont le siège de la symbiose mycorhizienne, n'ont pas de coiffe ni de poils absorbants. Elles présentent une croissance en longueur très limitée (au plus quelques millimètres).

Comparaison entre les deux types de racines chez les arbres à ectomycorhizes
(Jean GARBAYE)

Caractère	Racines longues	Racines courtes
Longueur	Plusieurs mètres	Quelques millimètres
Diamètre	Illimité	De l'ordre du millimètre
Structure	Secondaire (croissance en diamètre, production de bois)	Primaire (pas de croissance en diamètre, pas de lignification)
Apex	Long, renflé, pointu (« bout blanc »)	Court et arrondi
Coiffe	Oui	Non
Poils absorbants	Oui	Rares ou absents
Mycorhization	Non	Oui
Durée de vie	Plusieurs années	Quelques saisons
Allongement	Rapide et indéterminé	Lent et déterminé (limité à quelques millimètres)
Direction	Déterminée, verticale ou horizontale	Perpendiculaire à la racine longue
Réaction à la mort de l'apex	Emission de racines relais	Mort et chute des racines courtes
Absorption de l'eau	Faible	Forte



Dans les deux cas, la plante bénéficie d'une meilleure absorption des sels minéraux, comme le phosphore, ce qui se traduit par l'absence de poils absorbants. De plus, la plante est protégée des attaques des champignons et des nématodes. Parallèlement, le champignon bénéficie des sucres et d'autres molécules organiques produites par la plante.

Les mycorhizes sont fréquemment observées chez les plantes fossiles et l'on pense qu'elles ont dû jouer un rôle déterminant en permettant aux plantes vasculaires de s'établir sur Terre.



Les ectomycorhizes du pin s'étendent sur une certaine distance dans le sol.

De nombreuses études, réalisées en pots, ont montré que de jeunes plants mycorhizés poussent plus rapidement que des témoins plantés en terre stérile.

De même, la transplantation de plantes est plus efficace si les sols contiennent les bons champignons pour la mycorhization.

La symbiose fixatrice d'azote

Certains arbres ne se limitent pas aux symbioses mycorhiziennes. Leurs racines forment des renflements, appelés nodosités, qui peuvent mesurer de quelques millimètres à plusieurs centimètres. Ces nodosités sont peuplées de bactéries qui fixent l'azote atmosphérique en une forme organique assimilable par l'arbre. Celui-ci, directement engraisé, n'a pas à chercher l'azote organique disséminé dans le sol. En échange, comme pour les mycorhizes, l'arbre doit fournir des sucres aux bactéries symbiotiques.



Nodosités fixatrices d'azote sur des racines de pois

LISTE DES ESSENCES A ENDOMYCORHIZES, A ECTOMYCORHIZES ET FIXATRICES D'AZOTE

Jean GARBAYE

Les genres strictement de climat tropical ou méditerranéen ne figurent pas dans ce tableau.

Les genres ayant à la fois des endo- et des ectomycorhizes apparaissent dans les deux listes et sont en caractères gras. Par exemple, *Alnus* apparaît même dans les trois listes.

Essences à endomycorhizes		Essences à ectomycorhizes	Essences fixatrices d'azote
<i>Acacia</i>	<i>Malus</i>	<i>Abies</i>	<i>Alnus</i>
<i>Acer</i>	<i>Metasequoia</i>	<i>Alnus</i>	<i>Cercis</i>
<i>Ailanthus</i>	<i>Paulownia</i>	<i>Betula</i>	<i>Elaeagnus</i>
<i>Alnus</i>	<i>Platanus</i>	<i>Carpinus</i>	<i>Gleditsia</i>
<i>Araucaria</i>	<i>Populus</i>	<i>Carya</i>	<i>Robinia</i>
<i>Calocedrus</i>	<i>Prunus</i>	<i>Castanea</i>	<i>Sophora</i>
<i>Carya</i>	<i>Pterocarya</i>	<i>Cedrus</i>	
<i>Catalpa</i>	<i>Pyrus</i>	<i>Corylus</i>	
<i>Celtis</i>	<i>Robinia</i>	<i>Eucalyptus</i>	
<i>Cercis</i>	<i>Salix</i>	<i>Fagus</i>	
<i>Chamaecyparis</i>	<i>Sequoiadendron</i>	<i>Juglans</i>	
<i>Crataegus</i>	<i>Sophora</i>	<i>Larix</i>	
<i>Cryptomera</i>	<i>Sorbus</i>	<i>Nothofagus</i>	
<i>Cupressus</i>	<i>Taxodium</i>	<i>Ostrya</i>	
<i>Elaeagnus</i>	<i>Taxus</i>	<i>Ostryopsis</i>	
<i>Eucalyptus</i>	<i>Thuja</i>	<i>Picea</i>	
<i>Fraxinus</i>	<i>Ulmus</i>	<i>Pinus</i>	
<i>Gleditsia</i>	<i>X Cupressocyparis</i>	<i>Populus</i>	
<i>Juglans</i>	<i>Zelkova</i>	<i>Pseudotsuga</i>	
<i>Juniperus</i>		<i>Pterocarya</i>	
<i>Libocedrus</i>		<i>Quercus</i>	
<i>Liquidambar</i>		<i>Salix</i>	
<i>Liriodendron</i>		<i>Tilia</i>	
<i>Magnolia</i>		<i>Tsuga</i>	

3.4 EXCRETION

La racine excrète des ions H^+ , OH^- , K^+ , Na^+ , selon la nature et la quantité des ions absorbés, afin de conserver son équilibre électrochimique. Ainsi, une fertilisation azotée sous forme de nitrates NO_3^- augmente le pH du sol tandis qu'une fertilisation sous forme d'ions ammonium NH_4^+ l'acidifie. La racine excrète également diverses substances organiques, généralement des acides. Elle a donc une influence sur le pH et souvent sur la structure du sol.

3.5 SYNTHÈSES

Chez la majorité des arbres, l'azote n'est massivement envoyé sous forme minérale dans la partie aérienne que si la fertilisation et l'absorption sont excessives ; en conditions normales, c'est la racine qui synthétise une grande partie des acides aminés que les feuilles utiliseront dans la synthèse des protéines.

Les apex des racines en croissance sont avec les graines le lieu de synthèse des cytokinines. Ces substances de croissance, complémentaires ou antagonistes des auxines synthétisées par les apex de tiges en croissance, sont le véritable moteur de la morphogenèse des tiges.

3.6 MISE EN RESERVES

Les produits de la photosynthèse sont stockés, principalement sous forme d'amidon, dans les parties pérennes de l'arbre, en particulier la base du tronc, la souche et la base des grosses racines. Ces réserves peuvent être hydrolysées pour être utilisées dans la croissance aérienne et racinaire, ou transformées en polyphénols, barrières chimiques contre les insectes et champignons agresseurs.

Le système racinaire ne sert pas qu'à alimenter la plante en eau et à l'ancrer dans le sol ; il apparaît comme la moitié complémentaire de la partie aérienne dans toutes les fonctions de la plante.

4. La morphologie du système racinaire

4.1 LES DIFFERENTS SYSTEMES RACINAIRES

L'ensemble des racines d'une plante s'organise selon trois types de systèmes principaux et naturellement de tous les intermédiaires possibles :

Le système pivotant : C'est principalement le cas chez les Dicotylédones (chez les arbres, ensemble des feuillus) et les Gymnospermes (les Conifères). Il existe une racine principale à « gravitropisme positif » et des racines secondaires latérales.



Le système fasciculaire : C'est principalement le cas chez de nombreuses Monocotylédones (les graminées comme le blé par exemple). Les nombreuses racines ne dérivent pas d'une racine principale mais ont une origine commune. Elles croissent parallèlement en faisceau.



Les racines adventives : Dans certains cas, les racines peuvent apparaître sur des tiges, souvent au niveau des nœuds. C'est le cas du maïs, pour ne citer que lui.



Chez les arbres, la morphologie du système racinaire est extrêmement importante car elle conditionne une grande partie du développement et du fonctionnement.

4.2 CHEVELU ET CHARPENTE RACINAIRES

On distingue couramment la charpente (racines ligneuses) et le chevelu (racines fines).

4.2.1 Les racines ligneuses

Permanentées dans le sol, leur fonction principale est l'**ancrage de la structure**

- Elles constituent le squelette pérenne du système
- Leur diamètre varie du millimètre à plusieurs décimètres
- Elles ont une croissance annuelle en longueur et diamètre (forte activité « cambiale »)
- Leur ramification est continue : accroissement permanent du volume de sol exploré et exploité
- Elles portent les racines fines
- Elles conduisent la sève
- Elles stockent les réserves
- Elles ne sont pas mycorhizées

4.2.2 Les racines fines

Non ligneuses, temporaires, leur fonction principale est d'**absorber la solution du sol**

- Elles sont nombreuses et fragiles, ont un faible diamètre (quelques dixièmes de millimètres au plus) à l'origine.
- Leur durée de vie est brève : quelques semaines à quelques mois (souvent comparées aux feuilles par leur caractère caduc)
- Elles sont essentiellement situées près de la surface du sol (entre et 50 et 80 % selon les espèces et les milieux dans les 30 premiers centimètres du sol)
- Ce sont des racines à structure primaire pour la majorité d'entre elles (pas ou très peu d'activité cambiale : pas d'accroissement en diamètre)
- Certaines racines fines évoluent vers des racines ligneuses
- Elles constituent le complexe absorbant par lequel l'arbre puise la solution du sol
- Elles sont mycorhizées

Il existe des racines intermédiaires conductrices également caduques. Toutes les racines caduques se renouvellent une ou plusieurs fois par an pendant plusieurs années à peu près aux mêmes points sur la charpente. Leur décomposition contribue fortement au maintien du taux de matière organique dans le sol.

TYPE	FONCTION	DUREE DE VIE	RAMIFICATION	TYPES DE VEGETAUX
PRINCIPALE	Ancrage Stockage	Longue Meurt progressivement chez les arbres	Oui	Essentiellement Arbres et Arbustes
SECONDAIRE	Ancrage Stockage	Moyenne à longue Remplace progressivement la racine principale chez les arbres	Oui	Arbres, Arbustes, Plantes vivaces
RADICELLE	Absorption Ancrage chez les plantes herbacées	Brève Certaines donnent naissance aux racines ligneuses	Non, porte les poils absorbants	Tous les végétaux

4.3 RACINES SUPERFICIELLES ET RACINES PROFONDES

Nous avons déjà fait une distinction morphologique et fonctionnelle entre charpente et chevelu racinaires. Il est utile de distinguer également les racines horizontales qui colonisent les 20 à 50 premiers centimètres du sol et les racines plus profondes.

Un étage de racines superficielles peut parfois se développer sur le sol minéral, sous la litière de feuilles en décomposition : bouleau, épicéa (*Betula*, *Picea*) ; mais généralement les racines superficielles se développent dans les premiers horizons minéraux. Ceux-ci sont aérés, riches en matière organique et en éléments minéraux. Ils se réchauffent rapidement au printemps mais se refroidissent rapidement à l'automne, sont trop chauds et trop secs en été et trop froids en hiver. Les racines qui peuplent densément ces horizons ont une activité intense d'absorption hydrominérale au printemps et à l'automne, elles assurent l'essentiel de la pousse et des réserves. Les racines profondes assurent l'alimentation hydrique, donc la survie de la plante, en été et pendant les périodes de gel.

Certaines racines profondes croissent et se ramifient chaque année, mais peuvent rester sans alimenter la plante pendant de nombreuses années.

4.4 RACINES ET ANCRAGE

La stabilité de l'arbre ne dépend pas seulement de l'extension des racines, mais aussi de la densité de colonisation et de la cohésion entre sol et racines. En cas de tempête, les racines s'extirpent facilement des sols peu cohérents, tels que les sables et les sols gorgés d'eau : l'arbre est arraché même si l'extension racinaire est importante.

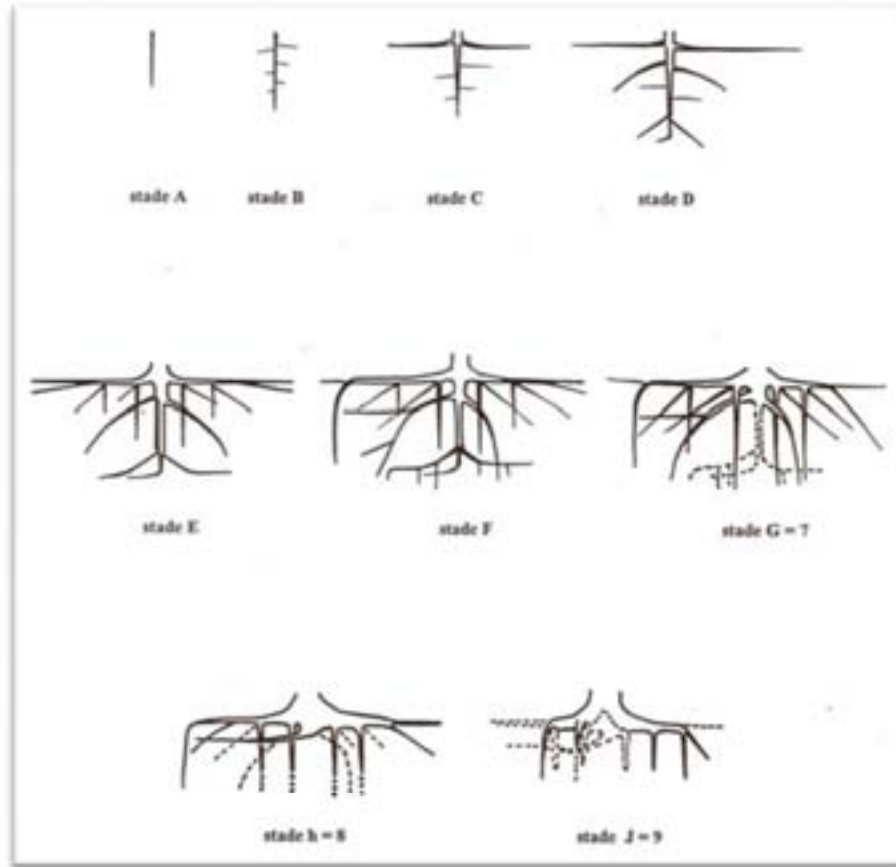


Par contre, si la cohésion entre sol et racines est forte, la stabilité de l'arbre dépend de l'ensemble racines + sol, et la masse à soulever est alors de plusieurs dizaines de tonnes. C'est le cas des sols rocheux fissurés bien colonisés.



4.5 LES STADES DE DEVELOPPEMENT

Chez la majorité des espèces, le système racinaire passe par les mêmes stades de développement.



d'après Pierre RAIMBAULT

Stade A.- La croissance du pivot se poursuit pendant quelques semaines.

Stade B.- Des racines secondaires se développent sur le pivot qui reste fortement dominant.

Stade C.- Quelques racines de la base du pivot, souvent aussi des racines adventives à la base du tronc, se développent rapidement à l'horizontale.

Stade D.- Pour différentes raisons, le pivot perd sa dominance et se ramifie. Les racines horizontales et de nouvelles racines obliques accélèrent leur croissance et forment ensemble le système fasciculé.

Stade E.- Les racines fasciculées émettent des racines verticales.

Stade F.- Les ramifications du pivot atteignent leur profondeur maximum. Elles sont rejointes par les ramifications verticales du système fasciculé.

Stade G.- Le pivot disparaît physiologiquement, il peut même disparaître physiquement. Il est remplacé par les nombreuses racines pivotantes du système fasciculé. Le système racinaire est à son apogée, la partie aérienne atteint son maximum d'extension et de densité (stade aérien 7).

Stade H.- Les racines obliques, les extrémités profondes des racines pivotantes meurent progressivement. Le chevelu ne se renouvelle plus aussi intensément. Le système racinaire est redevenu superficiel, sensible aux moindres variations de l'environnement, il est trop faible pour entretenir la masse de la partie aérienne dont la croissance stagne puis régresse (stade aérien 8, début stade 9).

Stade J.- Chez certains vieux individus, le développement de nouvelles branches très vigoureuses à proximité du tronc (réitérations totales) (fin stade 9 et stade 10) réactive certains secteurs du cambium qui induisent à leur tour le développement de nouvelles racines à la base des charpentières racinaires, et même à la base du tronc. Parallèlement à la réorganisation de la partie racinaire, l'arbre refait totalement ou partiellement un nouveau système racinaire en équilibre avec la partie aérienne. Le plus souvent, l'arbre est composé de plusieurs ensembles tige-racine physiologiquement indépendants.

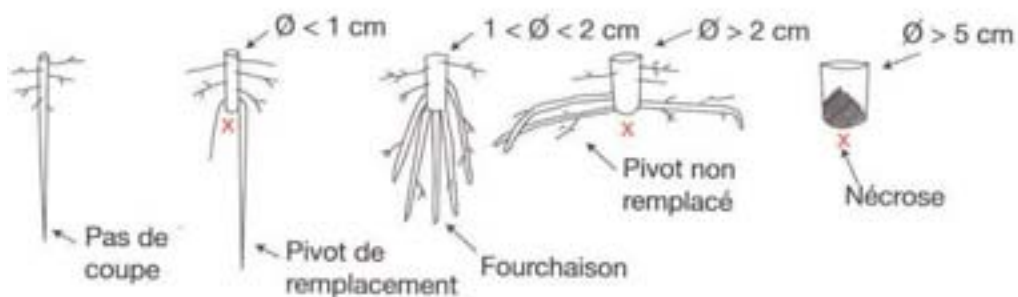


4.6 INFLUENCE DES TECHNIQUES CULTURALES SUR LE DEVELOPPEMENT DES RACINES

Les arbres plantés en pleine terre ne suivent pas toujours les schémas précédents. Les tailles répétées et les transplantations successives altèrent le développement de la partie aérienne et celui du système racinaire. Ceci s'applique en bonsaï lors des prélèvements et autres rempotages.

Trois phénomènes influencent la réaction des arbres quant à leur architecture racinaire :

Diamètre de la racine sectionnée



Christophe DRENOU d'après Pierre RAIMBAULT

La racine sectionnée réagit en développant plusieurs racines à proximité plus ou moins immédiate de la coupe.

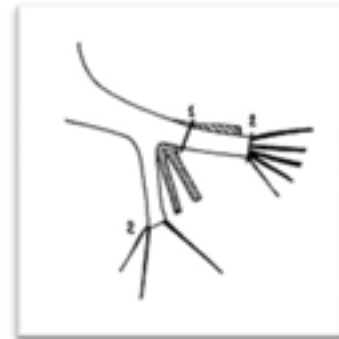
Si la racine sectionnée a moins d'un centimètre de diamètre, l'arbre restitue généralement un axe principal.

Si la racine a un à deux centimètres de diamètre, l'arbre sélectionne deux ou trois racines : la coupe a provoqué une ramification.

Si la racine a quelques centimètres de diamètre, aucune racine ne prend le relais et chacune se développe peu.

Les grosses racines sectionnées ne réagissent généralement pas sur coupe, au moins durablement. C'est une racine située en amont, de petit diamètre et située sur la face supérieure, qui prend le relais.

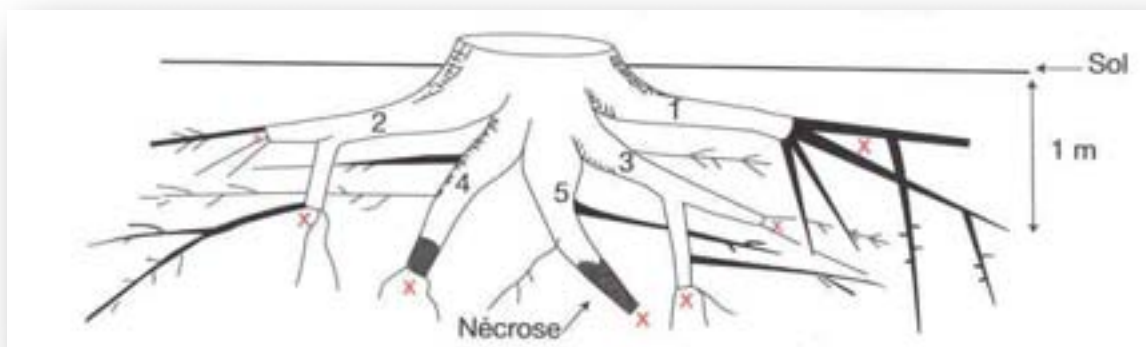
Succession de plusieurs transplantations



Si les deux premières transplantations suivant le semis sont effectuées dans de bonnes conditions, l'arbre étant encore très jeune (quelques années), celui-ci restitue une architecture racinaire typique de l'espèce, éventuellement un peu plus ramifiée.

Si plusieurs autres transplantations se succèdent, dans le cas de certains gros sujets par exemple, la capacité de sélection des axes s'amenuise, l'architecture est détruite, le système racinaire tend vers le type « poireau » (! La stabilité de l'arbre dans la nature peut en être affectée, car aucune vraie charpente ne se développe. La partie aérienne se développe en contrepartie de façon très modeste.

Croissance différentielle des racines superficielles et profondes



Christophe DRENOU d'après Pierre RAIMBAULT

Lors de la plantation définitive de gros sujets, les deux lois précédentes ne s'appliquent pas de la même façon à toutes les racines.

Les racines horizontales et superficielles (1 et 2) se développent très rapidement, elles colonisent d'abord les horizons supérieurs avant d'émettre des racines verticales ou de se verticaliser elles-mêmes.

Les racines obliques (3) et verticales profondes (4 et 5) réagissent d'autant plus faiblement qu'elles sont éloignées de la surface. Certaines ne réagissent même pas, et plusieurs années après la plantation, le plan de coupe est intact, sans ramification ni nécrose. Il existe probablement des différences spécifiques : le pivot sectionné du noyer (*Juglans*) finit par réémettre des racines verticales, tandis que le frêne (*Fraxinus*) et le hêtre (*Fagus*), ne réagissent pas.



5. De la théorie à la pratique : application au bonsaï



Comment tirer parti de tout cet apport théorique dans notre pratique du bonsaï ?

Nous pouvons identifier trois étapes où la connaissance du fonctionnement des racines nous aidera à faire les bons choix et comprendre pourquoi il est conseillé d'appliquer telle ou telle technique.

Ces phases-clés sont :

- Le prélèvement (pépinière en plein champ ou « yamadori » dans la nature)
- Les repotages
- Les soins tout au long de l'année (arrosage, fertilisation)

5.1 LE PRELEVEMENT :



Le schéma du paragraphe 4.6 sur le diamètre des racines coupées et leur réaction nous renseigne sur ce qu'il faut réaliser :

- ✓ Les racines de plus de 5 centimètres de diamètre ne réémettent pas de racines de remplacement; autant les couper court dès le prélèvement, elles nous gêneront de toute façon par la suite
- ✓ Les racines entre 2 et 5 centimètres vont-elles générer des racines secondaires de remplacement : les réserves utilisées la première année du prélèvement vont contribuer à cette reconstruction racinaire. Aussi, certains ont fait l'amère expérience de recouper ces racines plus court l'année

suivante, en se rendant compte qu'elles ne rentreraient pas dans un pot. L'arbre stressé du prélèvement n'avait pas reconstitué suffisamment ses réserves pour réagir à ce nouveau stress. La sanction est tombée : l'arbre est mort. Aussi, après un prélèvement, il est conseillé de laisser l'arbre « se refaire une santé » avant d'intervenir de nouveau (rempotage, ligature, bref tout stress important mobilisant les réserves de l'arbre.

- ✓ Les radicelles et racines fines (quelques millimètres) : c'est elle qui vont prendre le relai dès le prélèvement. Sans radicelles, cela s'appelle...une bouture !
- ✓ Les spores de mycorhize étant naturellement présentes dans le sol, l'incorporation d'un peu de terre d'origine favorise la reprise.
- ✓ Quant au substrat utilisé, un mélange drainant et aéré va faciliter la repousse racinaire (oxygène, hygrométrie)

5.2 LE REMPOTAGE

Les notions vues ci-dessus pour les prélèvements sont valables ici. La différence essentielle réside dans le diamètre des racines coupées. Gabriel ROMERO disait dans un article (France Bonsaï N°43 – Septembre 2004) que nous avons souvent l'occasion de travailler les branches (ligature, plusieurs tailles par an, etc.), mais rarement les racines, si ce n'est lors des rempotages. C'est pourquoi il est important de prendre son temps dans la sélection et la longueur de taille des racines. Les Japonais travaillent les érables racine après racine, laissant plus longue les petites radicelles, et coupant plus court les racines fines (4-5 millimètres de diamètres) : la réaction de l'arbre aux coupes est de multiplier les racines secondaires, et surtout celles proche du collet : c'est la principale technique à utiliser pour augmenter la taille du nebari.



5.2.1 Les périodes appropriées :

Elles correspondent au cycle de développement racinaire :

- Au printemps
 - Avant le débourrement des bourgeons sur les feuillus caduques : dès que les feuilles seront développées, le système racinaire doit être efficace sous peine de ne plus faire face aux besoins (eau, éléments nutritifs dissous dans la solution du sol).
 - Fin mars – début avril pour les conifères : démarrage des racines un peu plus tardif

- Automne : sur fin septembre – début octobre, nous aurons une deuxième poussée racinaire dont nous pourrons profiter, entre la chaleur de l'été et les premières gelées.

5.2.2 Quel type de sols ?

Comme nous l'avons vu, les racines croissent beaucoup plus facilement dans un mélange aéré et drainant (oxygène au niveau des racines) : akadama (terre limoneuse japonaise, travaillée sous forme de granules de différents diamètres), pouzzolane, pierre ponce (pumice)...



Les mélanges utilisés seront de granulométrie plus ou moins forte en fonction du degré de maturité de l'arbre :

- grosse granulométrie = forte pousse racinaire en longueur (arbres jeunes, forte pousse des branches également),
- plus faible granulométrie = plus de divisions racines, racines plus fines (arbres plus mature, meilleure ramification des branches)

Lors de l'opération de repotage, il faudra veiller à :

- ne pas laisser de poche d'air sous les racines (arrêt de la croissance racinaire). A cet effet, il faut souligner la culture des arbres dans des passoires : non seulement nous annihilons l'effet de « chignonnage » (enroulement des racines autour du pot), mais les racines qui passent par les trous de la passoire stoppent leur croissance (lumière, air libre). Cette technique permet d'augmenter la division des racines secondaires.



- Bien arrimer l'arbre au pot : avec le vent, l'arbre bouge (frein au bon développement racinaire par contact avec le sol, sans compter le risque de chute)
- Abriter les arbres nouvellement repotés, en particulier des vents secs et des dernières (ou premières gelées).



5.3 L'ENTRETIEN AU QUOTIDIEN

5.3.1 L'ARROSAGE

Le repotage n'a pas été fait cette année ? Nous le ferons l'année prochaine... Les branches ont un peu trop poussé ? On les taillera le mois prochain... La terre est très sèche, les feuilles commencent à perdre leur turgescence (au moins, les feuillus nous donnent des signes) : il n'est pas question d'oublier de les arroser. En été, la consommation en eau est maximale (température, ensoleillement, vent). A titre d'illustration, à poids égal, une plante consomme dix fois plus d'eau qu'un animal ! En effet, au niveau des feuilles, les échanges gazeux (CO_2) ne peuvent se réaliser que dissous. Aussi la surface des feuilles est maintenue coûte que coûte humide malgré le vent et l'évaporation.

Si le substrat est desséché, les poils absorbants meurent, puis l'extrémité des radicelles, etc. Mais cela, tout amateur de bonsaï s'en est rendu compte au moins une fois dans sa carrière !



5.3.2 LA FERTILISATION

La principale source d'alimentation des plantes reste la voie racinaire, la fertilisation foliaire étant plutôt complémentaire (carences diverses). A la lecture des différentes communications (articles dans les revues bonsaï, voire pire, les discussions sur les forums Internet...), il n'est pas rare de lire tout et son contraire. De la mystification aux opinions pseudo-écologique, tout y passe...

Le principal intérêt des engrais organiques est leur action... lente (dissolution des éléments au fil des arrosages) : le risque de « brûlure » racinaire est donc très limité.

L'inconvénient des engrais chimiques est à contrario leur action rapide, voire coup de fouet : l'ammonitrate sur la pelouse fait le bonheur des pompistes le week-end, voire le soir quand une tonte par semaine ne suffit plus !

Mais le risque de cette action rapide réside dans une forte concentration d'un élément, en particulier l'azote sous sa forme la plus assimilable, le nitrate : la solution du sol étant plus concentrée en azote que les cellules racinaires, le phénomène d'osmose joue son rôle à plein. L'eau va du milieu le moins concentré vers le plus concentré...

Donc, fertilisez bien sûr, mais plutôt plus souvent à petites doses, qu'une seule fois en grande quantité !



Conclusion

L'ensemble des chapitres abordés ne suffisent pas à être complet pour parler des racines et du système racinaire. L'interaction entre les racines des différentes plantes, l'effet « rhizosphère » près des racelles, les mécanismes d'absorption des ions de la solution du sol, l'influence des types de sol sur le développement racinaire... sont autant de sujet qui peuvent venir abonder les connaissances sur le monde souterrain.

Néanmoins, sans être exhaustif, ce mémoire est amplement suffisant à l'amateur de bonsaï qui s'intéresse un tant soit peu à la physiologie végétale.

Cela permet de comprendre ce qui se passe après un prélèvement (taille de grosses racines), après un rempotage (taille des racines fines), pourquoi il faut parfois conserver de la terre d'origine (mycorhizes), pourquoi l'érable de Burger a des racines toutes blanches qui filent sous le pot (espèce à endomycorhize) et ainsi de suite.

« Comment faites-vous pour que votre bonsaï vive dans aussi peu de terre ? et dans un pot aussi plat ? » ou bien encore « J'ai compris : c'est comme les pieds des chinoises, vous serrez les racines pour qu'elles ne grandissent pas... ».

Toutes ces questions de béotien - voire d'inepties - ont toutes été entendues au moins une centaine de fois par tout amateur de bonsaï ayant quelques années de pratique derrière lui.

En espérant que ce mémoire apporte quelques réponses (certes scientifiques, parfois ardues) à ces multiples questions.



Hêtre pourpre du parc municipal de Montville (76)

BIBLIOGRAPHIE

- ✚ « La physiologie et l'architecture des racines » Dr. Pierre RAIMBAULT (Institut National d'Horticulture - INH, Angers) in 9ème congrès de l'APEVC, Igualada 8 octobre 2003 - « El paisatge ocult de la ciutat: Les arrels dels arbres »

- ✚ “Les racines, face cache des arbres” – Christophe DRENOU, coordinateur, Institut pour le Développement Forestier IDF : ouvrage complet édité par l'IDF rassemblant les travaux de plusieurs chercheurs (Pierre RAIMBAULT, Jean GARBAYE...) sur les racines des arbres

- ✚ <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/racine/> : excellent site internet avec l'ensemble des schémas de la physiologie de la racine, avec même des petites vidéos (croissance de la racine)

- ✚ <http://domenicus.malleotus.free.fr/v/angiospermes - racines.htm>

- ✚ Différentes sources Internet (photos, schémas) dont...Wikipédia !