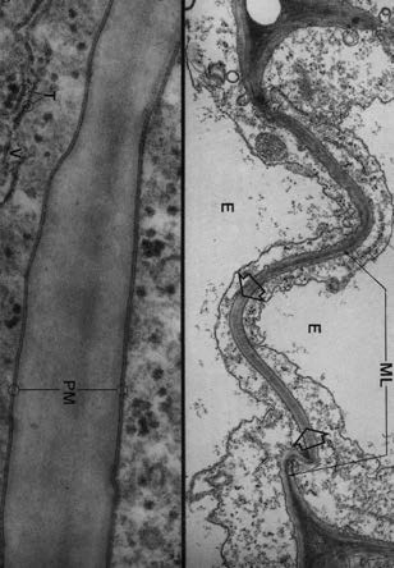
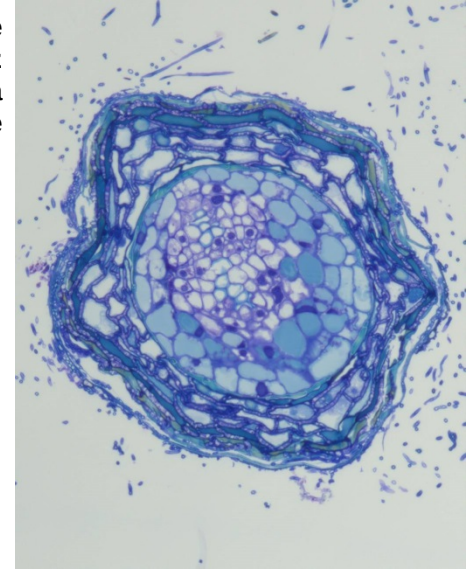




Le cadre de Caspary:
une structure clé pour
la circulation de la
sève

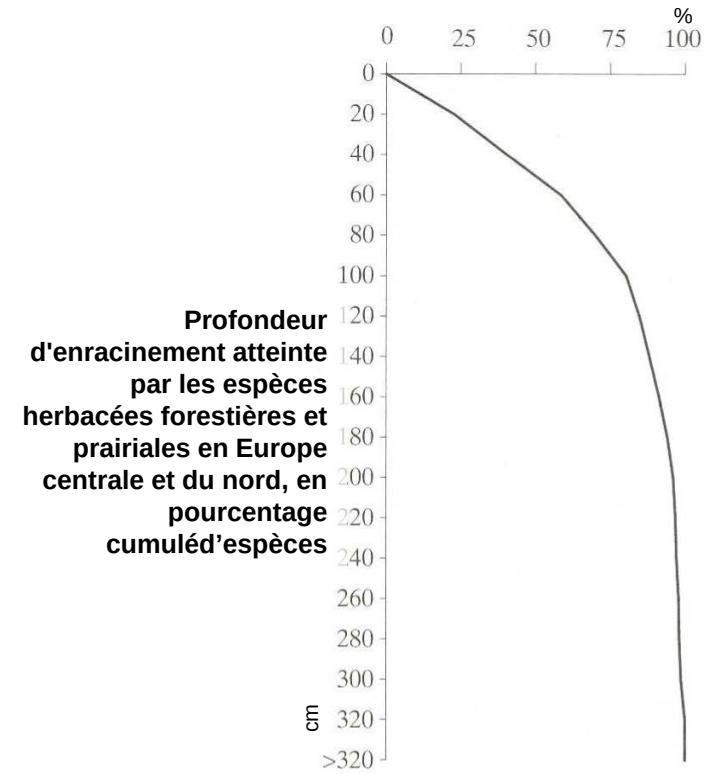
Partie absorbante
de la racine chez
l'épicéa et sa
mycorrhize



4. La racine: de la cellule aux interactions plante-sol



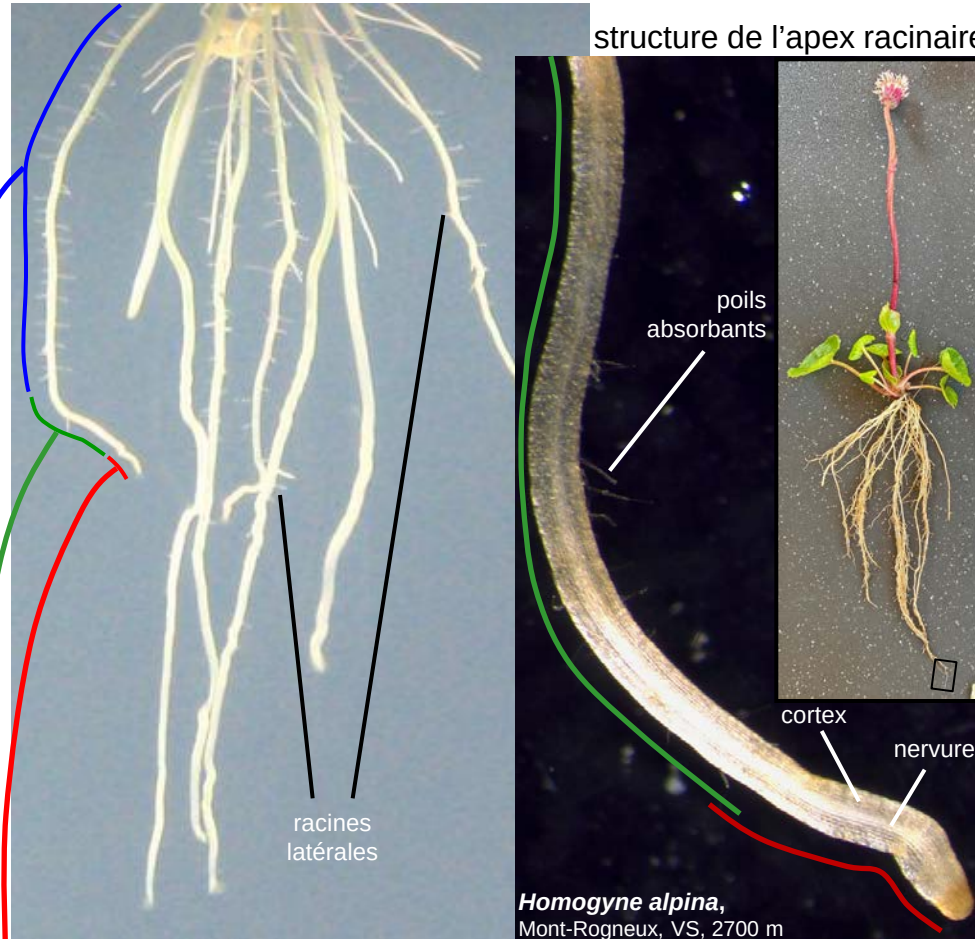
Contraste des systèmes
racinaires chez une
Arecaceae à racines
adventives en échasses
et une dicotylédone à
racines-contreforts.
Jungle de Boca Tapada,
Costa Rica 2021



4. Morphologie et fonctions de la racine

appareil racinaire d'une jeune herbacée

structure de l'apex racinaire



partie en croissance (division: 0.26-0.8 mm;
différenciation: 0.58-2 mm)

partie assimilatrice (10-40 mm)

partie conductrice (quelques cm à plusieurs m)

détail des zones fonctionnelles

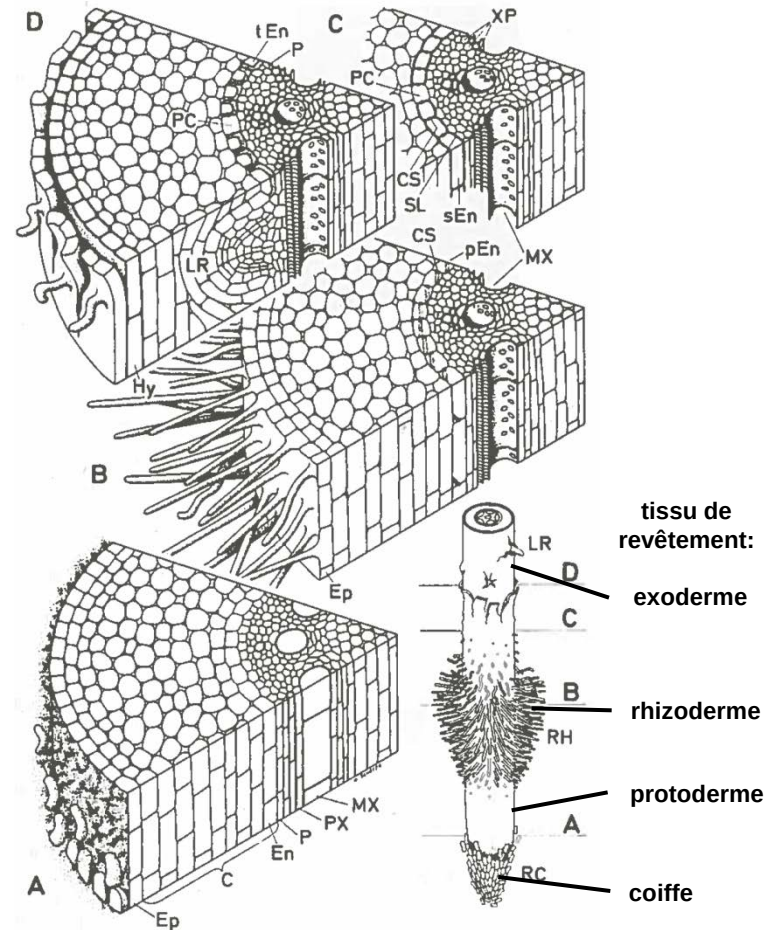


Figure 21-2. Schéma tridimensionnel d'une racine primaire (en bas, à droite) et coupes transversales à quatre niveaux de la racine (A-D). (A) Zone de croissance et de différenciation ; (B) Zone pilifère avec endoderme primaire; (C) Zone de l'endoderme secondaire; (D) Zone de ramification ou de formation des racines latérales, de l'hypoderme et de l'endoderme tertiaire. C, écorce (cortex); es, cadre de Caspary; En, endoderme (pEn, primaire; sEn, secondaire; tEn, tertiaire); Ep, épiderme; Hy, hypoderme; LR, ébauche d'une racine latérale; Mx, métaxylème (xylème plus efficace qui se forme plus tard); P, péricycle; PC, cellule de passage; PX, protoxylème (xylème moins efficace qui se forme en premier); RC, coiffe; RH, poil absorbant; SL, Lamelle subérinique; XP, Parenchyme du xylème. {D'après U. LÜTTGE, EncycLopedia of Plant Physiology, vol. 15A, Springer, Heidelberg, 1983}.

référence: Lüttge et al. (2005). Botanique. Tec&Doc-Lavoisier



4. Encart no. 21: diversité structurale en relation avec les changements fonctionnels

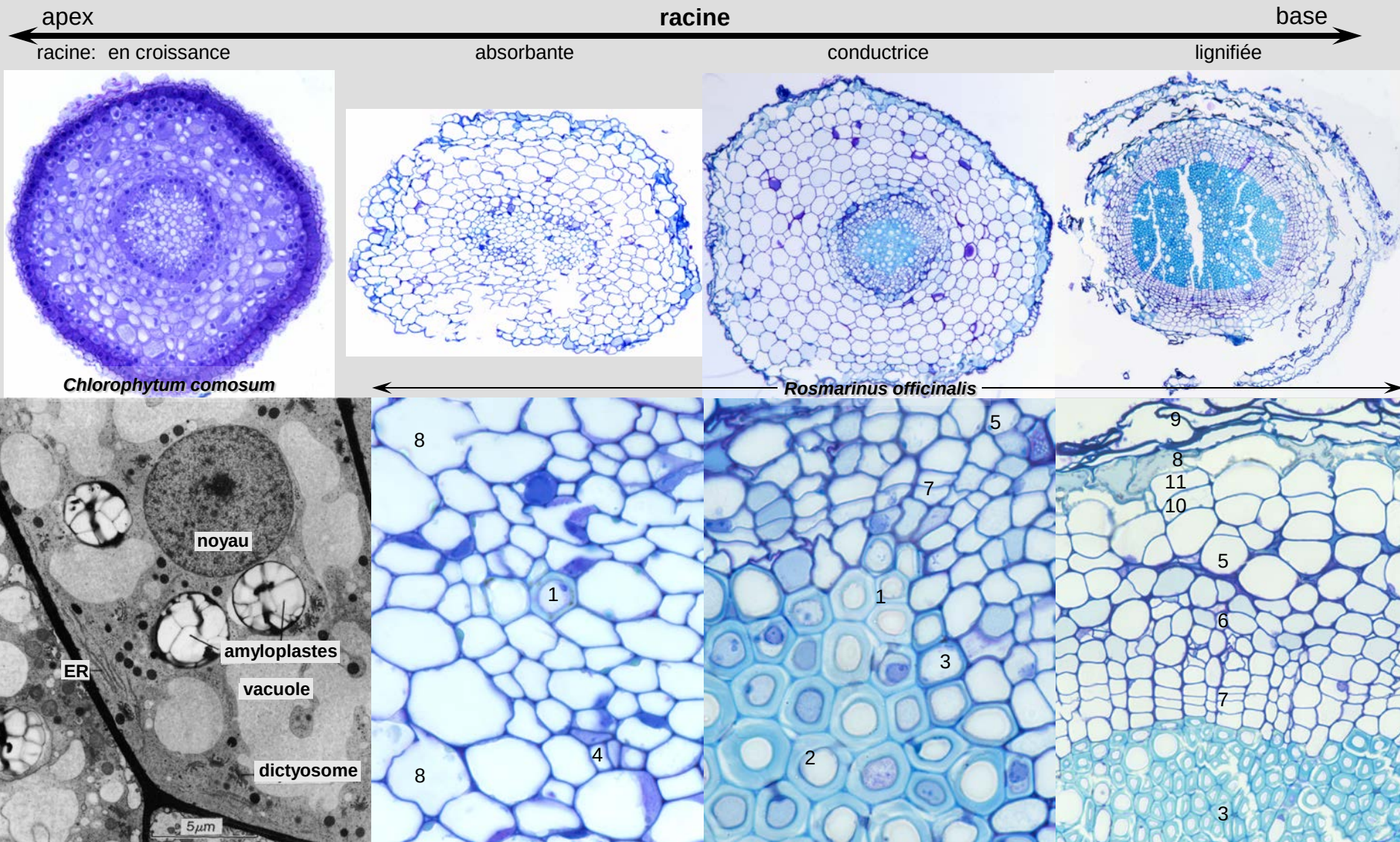


Fig. 1.48. Les cellules dans le méristème apical de la racine de *Nicotiana* disposent de l'arsenal cytotologique nécessaire pour les synthèses métaboliques. Les nombreuses vésicules formées par les dictyosomes signalent l'intense activité de synthèse pariétale. Malgré l'emploi continu d'assimilats pour la croissance, on observe de nombreux amyloplastes stockant des réserves d'amidon (Kiss et al. 1990).

référence: Eschrich (1995). Funktionelle Pflanzenanatomie. Springer Verlag, Berlin.

- 1: protoxylème
- 2: métaxylème
- 3: xylème secondaire

- 4: proto/métaphloème
- 5: métaphloème
- 6: phloème secondaire

- 7: cambium
- 8: endoderme
- 9: cortex

- 10: phellogène
- 11: suber

4. Absorption de l'eau et des sels minéraux (1): modifications structurales et fonctionnelles de l'endoderme

imperméabilisation de l'endoderme dans la racine conductrice

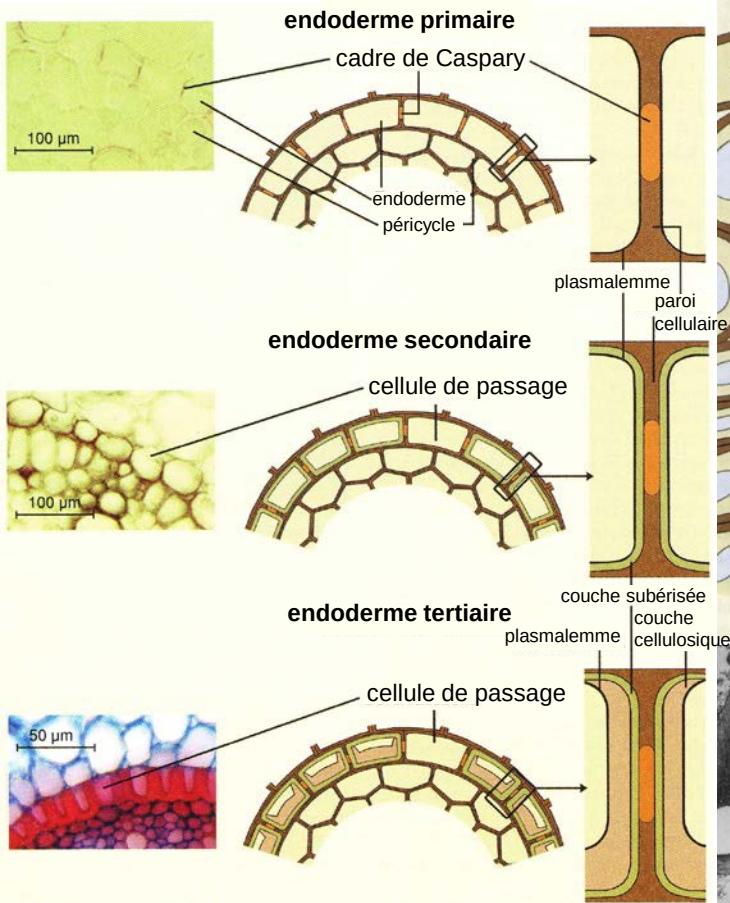


Figure 21-4. Développement de l'endoderme. Au centre, coupe transversale d'une racine primaire dans la zone de l'endoderme. A droite, représentations schématiques des parois cellulaires radiales de l'endoderme et, à gauche, micrographies de coupes transversales de la racine dans la zone de l'endoderme. Les micrographies de l'endoderme primaire et secondaire ont été obtenues à partir de coupes transversales de racines de maïs (*Zea mays*), celle de l'endoderme tertiaire à partir de sections de racines d'iris (*Iris germanica*).

structure de l'endoderme dans la racine absorbante

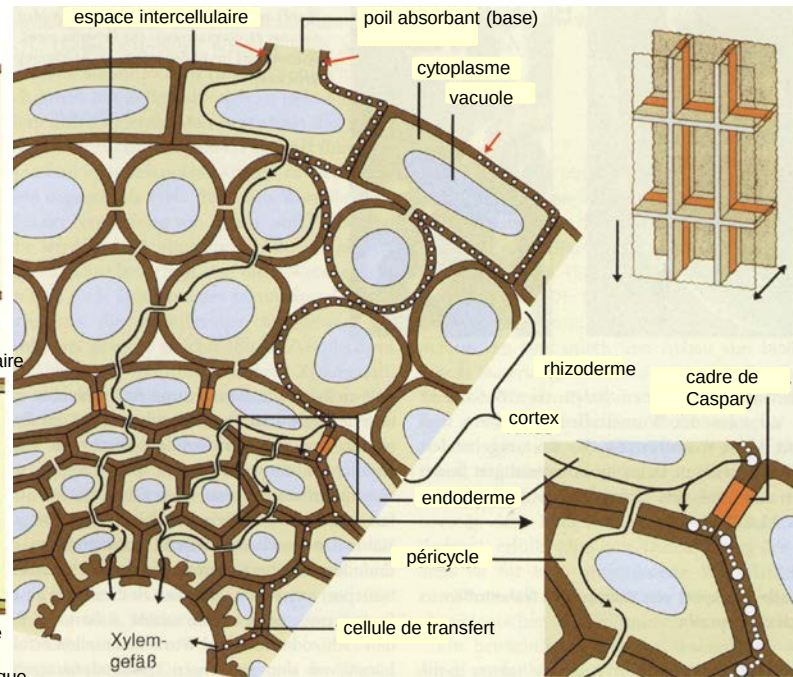
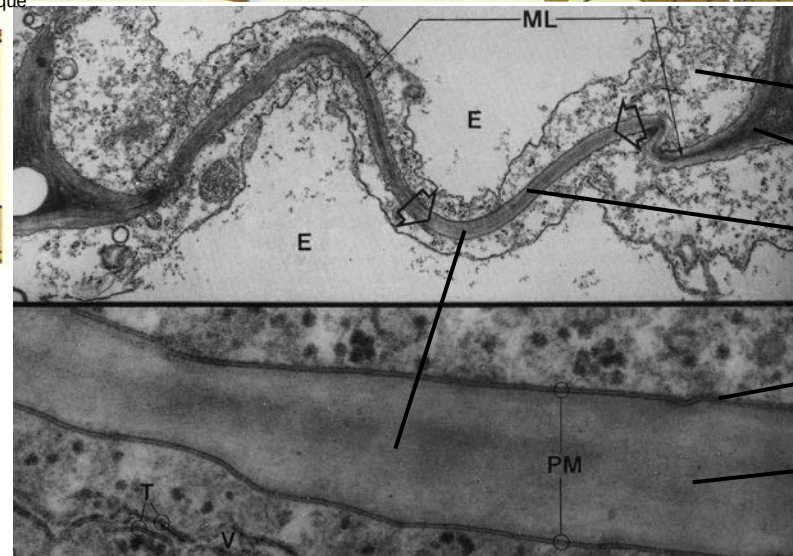


Figure 21-9. Voies du transport radial de l'eau et des sels nutritifs dans la racine primaire, au niveau de la zone des poils absorbants. Ligne en pointillés: transport apoplastique; ligne en trait discontinu: transport symplastique. Le schéma détaillé met en évidence la rupture du transport apoplastique au niveau du cadre de CASPARY. Le schéma en haut à droite présente la structure tridimensionnelle de cadres de Caspary (bandes brunes). Cette structure sépare le cortex du cylindre central (extrait de U LÜTTGE and N. HIGINBOTHAM, *Transport in Plants*, Springer, New York, 1979).



structure du cadre de Caspary

- endoderme
- paroi primaire
- cadre de Caspary
- plasmalemmes étroitement appliqué contre la paroi primaire
- paroi primaire incrustée de subérine

référence: - Lüttge et al. (2005). Botanique. Tec&Doc-Lavoisier.
- Gunning et Steer (1995). Plant cell biology. Jones & Bartlett publ., London.

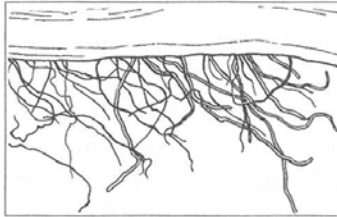
4. Absorption de l'eau et des sels minéraux (2): le rôle du rhizoderme et de l'exoderme

le rhizoderme

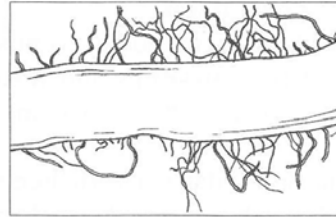
1 *Salsola kali*
Soude brûlée



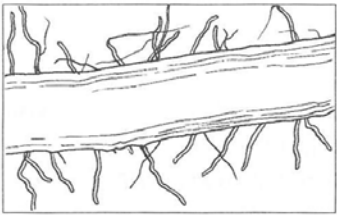
2 *Lycopersicon esculentum*
Tomate



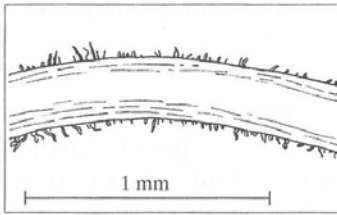
3 *Lactuca sativa*
Salade pommée



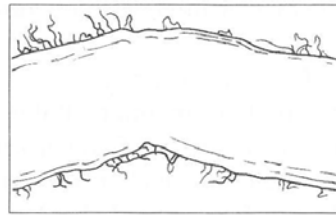
4 *Triticum aestivum*
Blé



5 *Daucus carota*
carotte



6 *Allium cepa*
oignon



variabilité interspécifique de la zone pilifère. Une zone pilifère plus développée permet l'absorption de davantage d'éléments minéraux, notamment de phosphore ($\mu\text{mol/pot}$)

l'exoderme

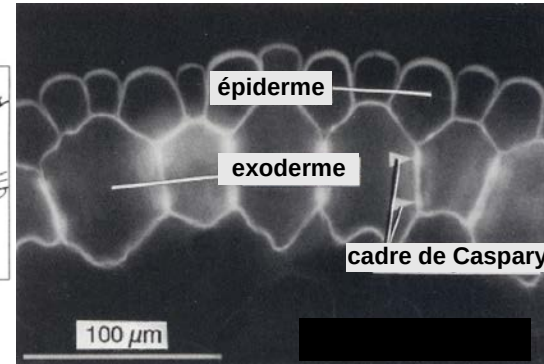


Fig. 1.25. Exemple de cadres de Caspary dans les parois radiales de cellules d'exoderme de jeunes racines de maïs (*Zea mays*). Cette structure est aussi observée chez d'autres angiospermes (Perumalla et al. 1990), avec une fonction similaire de contrôle des flux de ions à travers la racine.

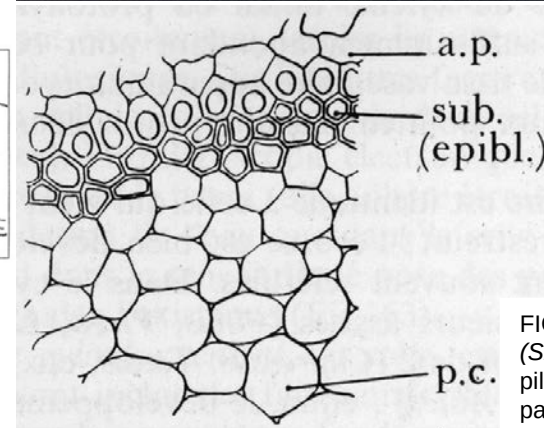
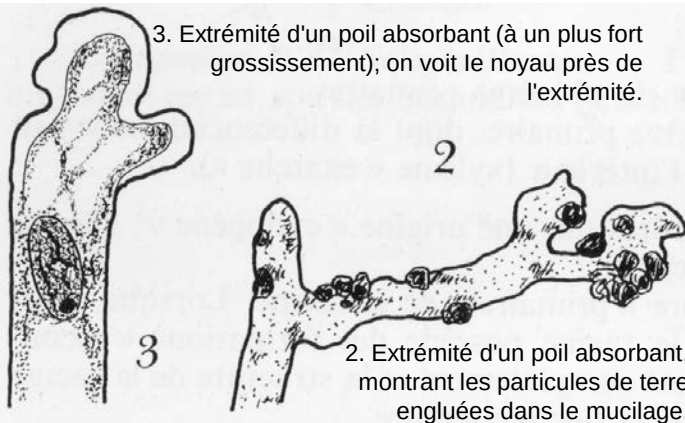


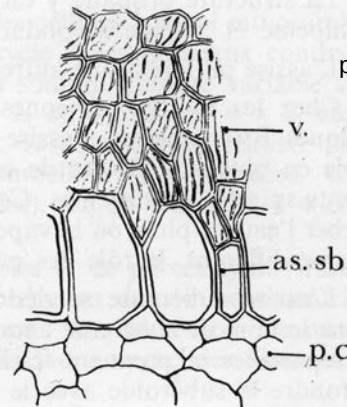
FIG. 64. - Racine de salsepareille (*Smilax medica*) a.p., assise pilifère ; sub., subéroïde, p.c., parenchyme cortical.



Encart no. 22: le cas particulier de la racine aérienne des épiphytes

Les épiphytes (par ex. des orchidées) des forêts humides ont leurs racines aériennes pourvues de structures spécialisées permettant l'absorption de l'humidité atmosphérique, tout en empêchant la dessiccation des racines.

Le rhizoderme, ou velamen (v.), est multistraté, avec des cellules mortes à maturité. Les parois cellulaires, à ornements spiralés, sont hygroscopiques. L'eau de condensation ne parvient au parenchyme cortical (p.c.) qu'après avoir traversé une assise subéreuse (as.sb.) hydrophobe.



Clematidium pulchellum
Mata Atlantica,
Brésil 2017

Références:

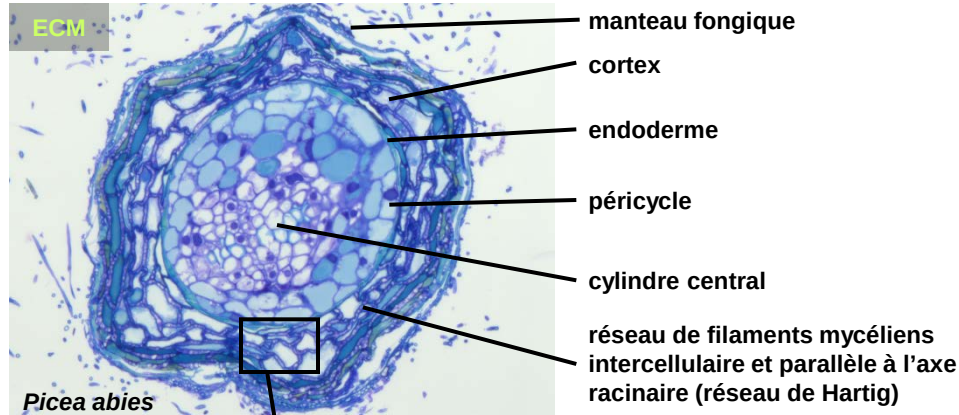
- Eschrich (1995). Funktionelle Pflanzenanatomie. Springer Verlag, Berlin
- Deysson (1978). Organisation et classification des plantes vasculaires. Sedes, Paris.
- Polomski et Kuhn (1998). Wurzelsysteme. Haupt Verlag, Bern.

4. Absorption de l'eau et des sels minéraux (3): les mycorhizes

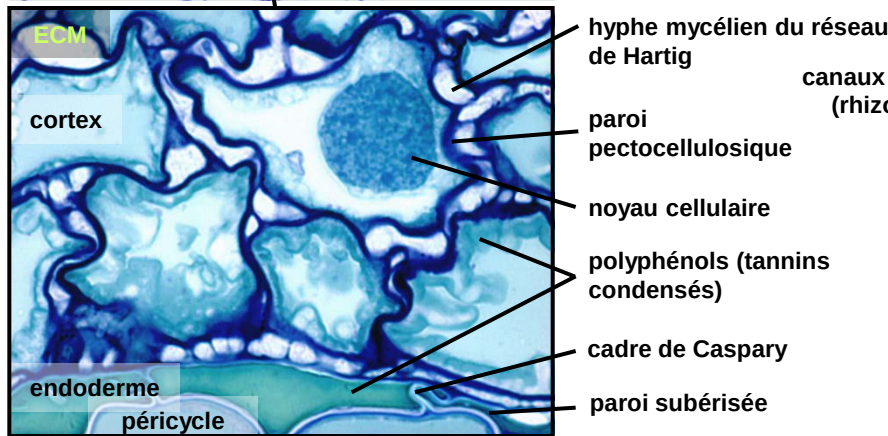
morphologie
sans mycorhize



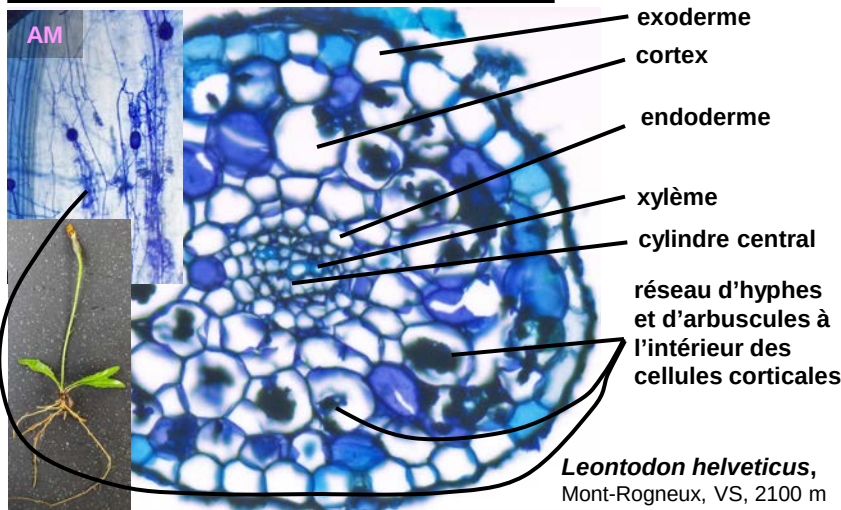
épicea



Picea abies

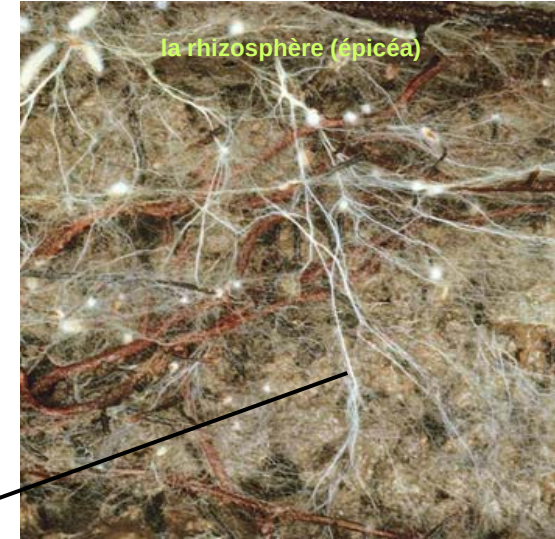


ecto mycorhize (ECM)



Leontodon helveticus,
Mont-Rogneux, VS, 2100 m

la rhizosphère (épicea)



canaux mycéliens
(rhizomorphes)

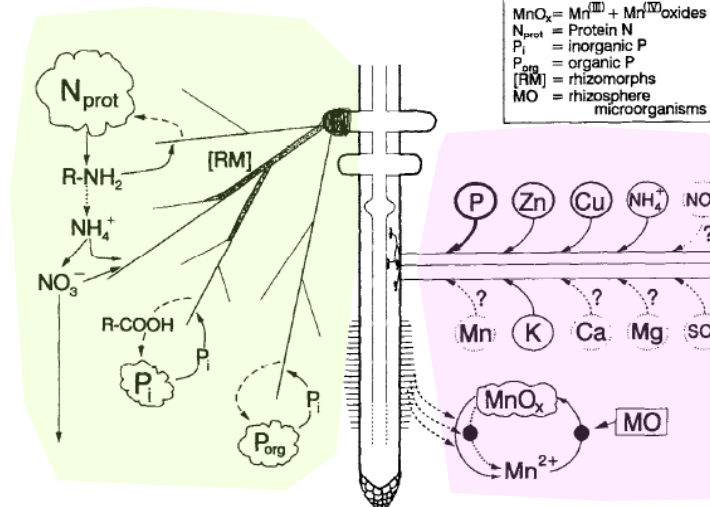


Fig. 15.25 Schematic presentation of components of the nutrient dynamics in and acquisition from the 'hyphosphere' of endo- (VA-) mycorrhizal roots and of additional components found in ectomycorrhizal roots. (Marschner and Dell, 1994.)

référence:

- Egli et Brunner (2002). Les mycorhizes. WSL, CH8903 Birmensdorf
- Marschner (1995). Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London
- Whiteside et al. (2009) Ecology 90, 100-108

4. Encart no. 23: diversité morphologique et fonctionnelle des ectomycorrhizes

Les partenaires fongiques des ectomycorrhizes font preuve d'une grande variabilité morphologique en relation probable avec leurs aptitudes variées d'absorption et d'exportation des nutriments

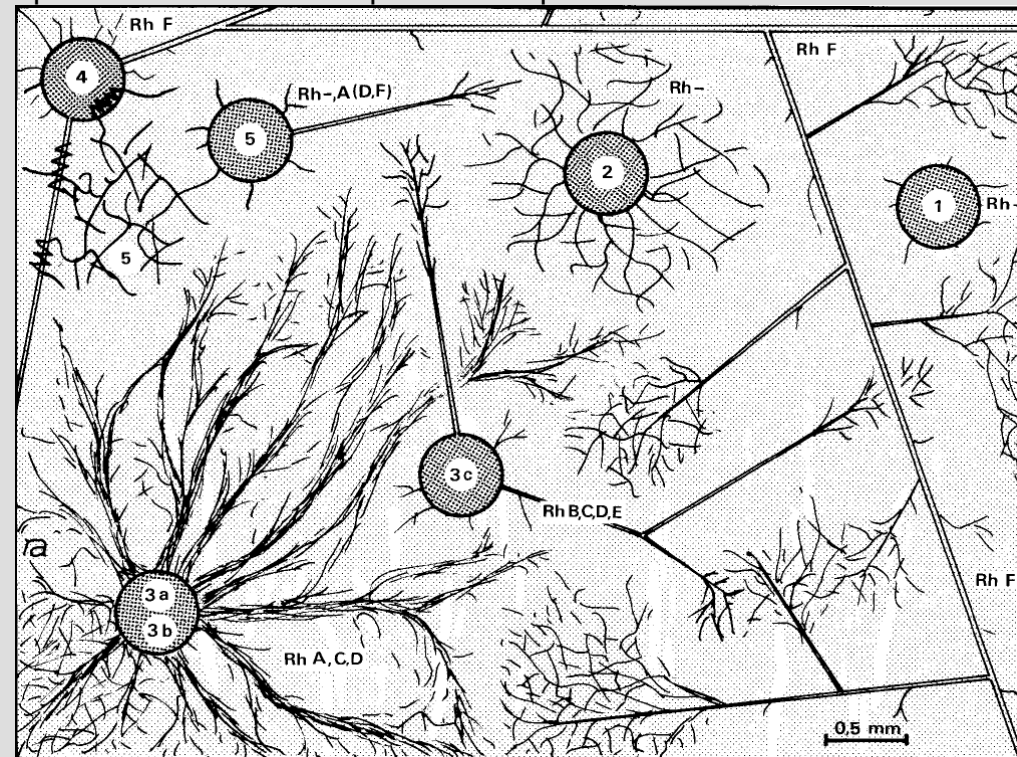


Fig. 1 Schematic drawings of different exploration strategies, represented by cross-sections of ectomycorrhizae and the extramatrical mycelium. 1 Contact exploration, 2 short-distance exploration, 3a, b medium-distance fringe exploration and medium-distance mat exploration, 3c medium-distance smooth exploration, 4 long-distance exploration, 5 pick-a-back exploration, shown as mycorrhiza and as soil hyphae in contact and intruding into rhizomorphs and ectomycorrhizae of a long distance exploration type ectomycorrhiza. All figures are to scale (Rh rhizomorph, – rhizomorph lacking, A–F organization types of rhizomorphs according to Agerer 1987–1998, 1991a)

- La partie fongique distale de la mycorrhize est la plus fine, la plus hydrophile et en charge de l'absorption et de l'importation de l'eau et des nutriments. Les rhizomorphes des types morphologiques 3 et 4, sont de nature plus hydrophobe et en charge du transport. Le manteau fongique est spécialisé dans les échanges avec le symbionte.
- Certaines mycorrhizes colonisent et épi-parasitent d'autres mycorrhizes (type 5).
- Les types morphologiques 1 et 2 peuvent montrer des capacités lignolytiques supérieures.
- Les types morphologiques 3 et 4 peuvent être plus efficaces concernant l'approvisionnement en phosphore de la plante hôte.

référence: Agerer (2001). Exploration types of ectomycorrhizae. Mycorrhiza 11, 107-114.

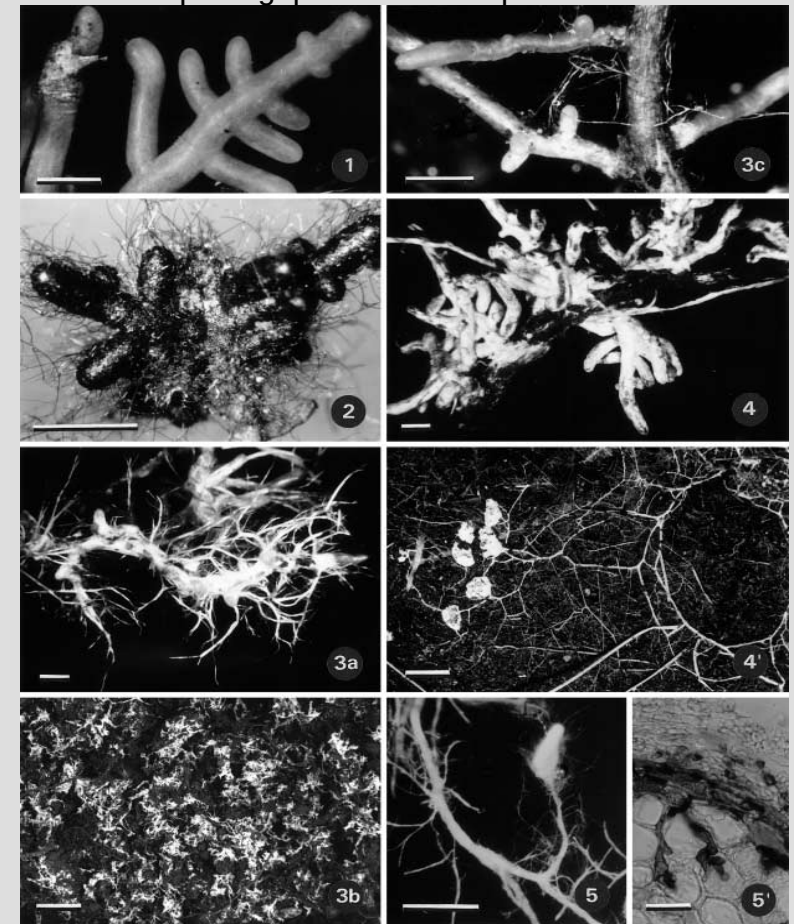


Fig. 2 Examples of exploration strategies. 1 *Lactarius* sp.: contact exploration, 2 "*Quercirhiza squamosa*": short-distance exploration, 3a *Dermocybe cinnamomeolutea*: medium distance fringe exploration, 3b *Hysterangium stoloniferum*: medium-distance mat exploration, 3c *Thelephora terrestris*: medium-distance smooth exploration, 4 *Boletinus cavipes*: long-distance exploration, monopodial ectomycorrhizal system, 4' *Suillus plorans*: long-distance exploration, tuberculate mycorrhizal system, 5 *Chroogomphus helveticus* ssp. *tatrensis* primordium growing on a rhizomorph of *Rhizopogon* sp.: pick-a-back exploration, 5' *Chroogomphus helveticus* ssp. *tatrensis* hyphae (stained blue with Melzer's reagent) in ectomycorrhiza of *Rhizopogon* sp.: pick-a-back exploration; bars 1, 2, 3a, c, 4: 1 mm, 3b: 10 mm, 4': 5 mm, 5': 30 µm

4. Relations plantes – champignons mycorrhiziens

-  plantes sans mycorhizes
-  plantes à endomycorhizes arbusculaires
-  plantes à la fois à endomycorhizes arbusculaires et à ectomycorhizes
-  plantes à ectomycorhizes
-  plantes à mycorhizes érlicoïdes

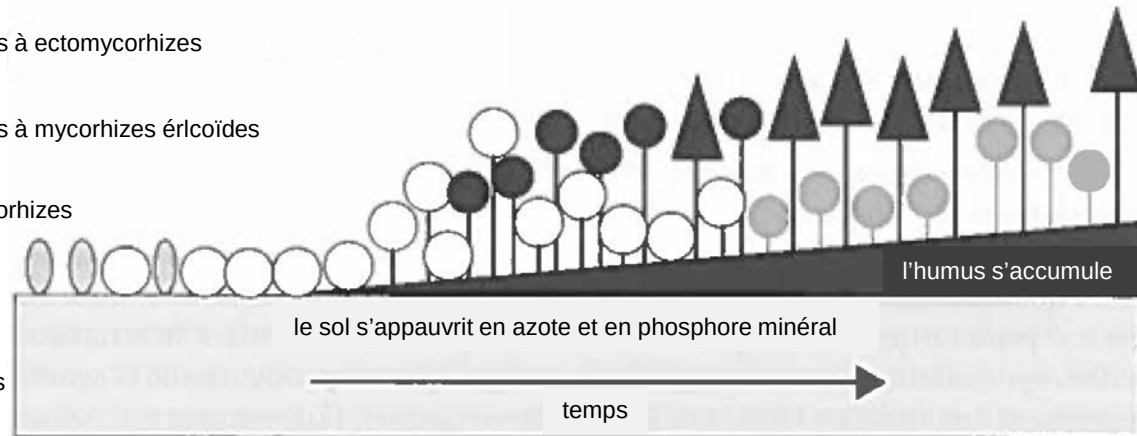
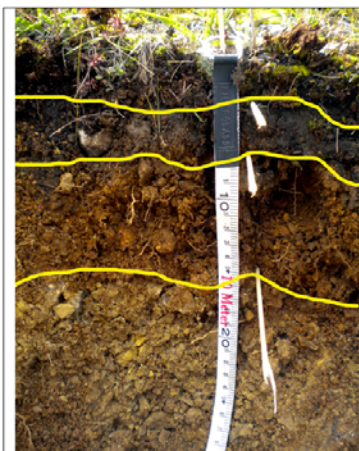


Figure 19. Représentation schématique d'une succession primaire d'espèces végétales colonisant un sol nu, depuis l'installation des premières plantes pionnières sans mycorhizes (à gauche) jusqu'au stade stabilisé d'une forêt d'arbres à ectomycorhizes avec un sous-bois d'Ericacées (à droite).



0 cm
3 cm
20 cm

OL : +0.5-0.25 cm.
OFzo : +0.25-0 cm.

Aca de juxtaposition: 0 - 3 cm. Couleur: brun foncé. Structure: légèrement grumeleuse. Texture: limono argilo-sableux. Porosité: moyenne. Racines: 4/5, petites. Squelette: 10-30%, graviers et cailloux. pH 6, HCl 3/4.

Limite ondulée, transition nette.

JpZ : 3 - 20 cm. Couleur: jaune rouge. Structure: minérale sableuse. Texture: limono-sableux. Porosité: moyenne. Racines: 2/5. Squelette: 50-75%, graviers et cailloux. pH 7, HCl 4/4.

Limite ondulée, transition nette.

Ztc : 20 - 35+ cm. Couleur: rose. Structure: minérale sableuse. Texture: limono-argileux. Porosité: forte. Racines: 0/5. Squelette: 75%, graviers et cailloux. pH 7.5, HCl 4/4.



Racines myco-hétérotrophiques chez *Monotropa uniflora* parasitant *Russula braeuvipes*.

Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Myc_o-heterotrophy



Réseaux mycorrhiziens complexes: le cas de la myco-hétérotrophie sur sol évolué en vieille futaie. Chez *Monotropa hypopitys*, la mycorrhization est entièrement au bénéfice de la plante vasculaire, avec acquisition du carbone en sus des éléments minéraux (parasitisme de l'hôte fongique). Cette stratégie peut être dictée par les conditions d'ombrage marqué et l'abondance du carbone disponible – dans le cas ici d'une hêtraie à sapin mésophile montagnarde (*Abieti-Fagetum typicum*) du Jura vaudois (MutruX 1050 m, 09 juillet 2016)

2 cas aux extrêmes

Sols bruts et plantes non-mycorhyziennes: le cas de *Biscutella laeviga*, Brassicaceae, sur anthrosols bruts et contaminés. La contamination en métaux lourds (Zn_{tot} : 55'000-104'000 ppm) inhibe fortement l'activité biologique et l'incorporation de la matière organique (pas d'horizon B), ce que tolèrent les espèces sans mycorhizes. Sol: rendosol à oligomull développé dans un anthrosol artificiel calcaire, sur terril dolomitique riche en Zn et Pb. (Site industriel d'Olkusz, Pologne, 325 m, 24 septembre 2013).

références:

- Garbaye (2013). La symbiose mycorrhizienne.
- Éd. Quae, Versailles
- Polek (2014) Site recovery in the Zn-Pb mine of Olkusz.
- Master thesis, BGS



4. Morphologie des systèmes racinaires

les végétaux sans racines: les arhizophytes

formes intermédiaire: les mousses (Bryophytes) avec des rhizoïdes

les végétaux avec des racines: les rhizophytes

les spermaphytes

les gymnospermes

les monocotylédones

les dicotylédones

système racinaire
hétérogène

allorhizie à racines
primaires ramifiées

système racinaire homogène
(à partir d'axes végétatifs).
Homorhizie secondaire à
racines adventives fasciculées

allorhizie

système racinaire
hétérogènes

racines primaires
complétées par des
racines adventives à
partir d'axes végétatifs

couronne
racinaire

racines primaires
et racines
traçantes
d'ordre 2-n

axe
végétatif
radicant

axe végétatif
épaissi ou
fibreux

racines
fasciculées et
densément
ramifiées,
tubercules

couronne
racinaire

racines primaires
complétées par des
racines adventives à
partir d'axes végétatifs

pivots primaires
et secondaires
verticaux

charpentières
primaires et
secondaires,
horizontales
ou obliques

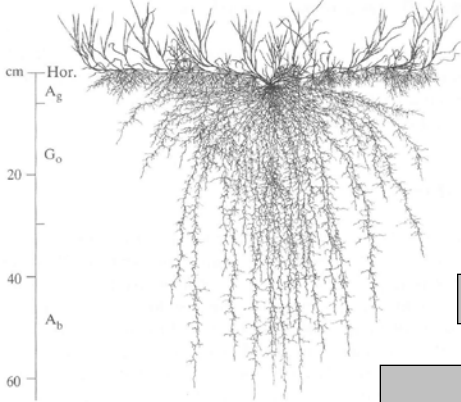
pivots primaires
et secondaires
verticaux

charpentières
primaires et
secondaires,
horizontales
ou obliques

allorhizie chez *Phyteuma spicatum*:
racine pivotante pérenne avec des
racines fines, latérales et ramifiées

les ptéridophytes

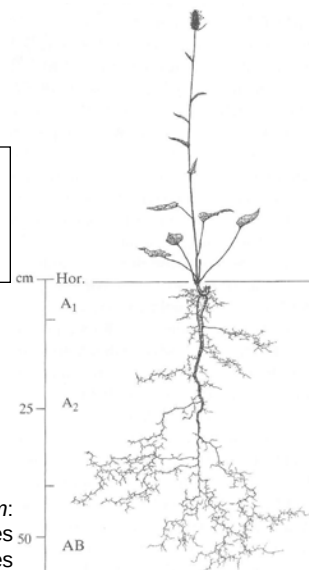
système racinaire
homogène (à partir
d'axes végétatifs).
Homorhizie primaire à
racines fasciculées



homorhizie secondaire chez
Agrostis stolonifera: axes
(stolons) radicans portant des
racines adventives fasciculées



Contraste des systèmes racinaires
chez une *Arecaceae* à racines
adventives en échasses et une
dicotylédone à racines-contreforts.
Jungle de Boca Tapada, Costa Rica
2021



4. Colonisation du sol

Organisme	Diamètre (µm)
racines	
monocotylédones	
racines adventives	110-4200
ramification de premier ordre	230
dicotylédones	
racines principales	100-4000
racines latérales	35-1500
arbres	
racines traçantes	2000-4000
racines courtes	1000-2000
racines fines	300-1000
poils absorbants	1-25
Hyphes fongiques	
ectomycorrhizes	3-12
AM	2-20
Glomus sp.	≤ 5
non symbiotique	1-2
Porosité du sol	
larges pores grossiers	> 50
petits pores grossiers	10-50
pores intermédiaires	0.2-10
pores fins	< 0.2

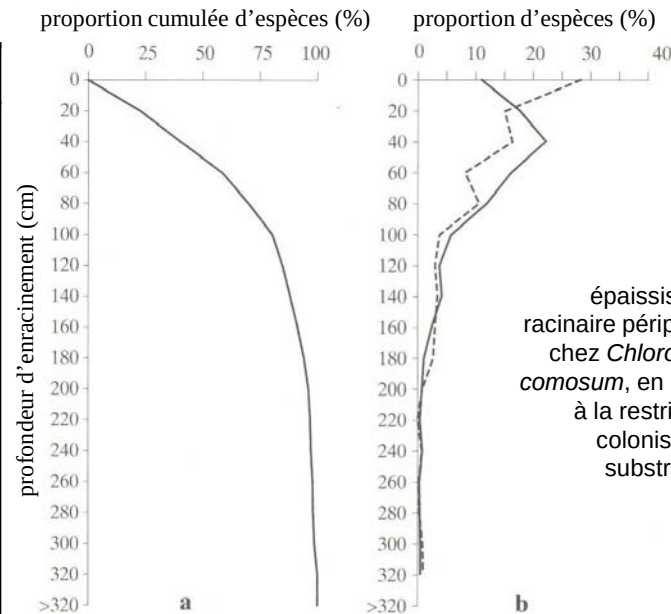


Fig.4.7 (métadonnées).

a) Profondeur d'enracinement atteinte par les mono- et dicotylédones herbacées forestières et prairiales en Europe centrale et du nord, en pourcentage cumulé d'espèces.

b) Comparaison de la profondeur d'enracinement d'espèces herbacées forestières (----) et prairiales. (—)

épaississement racinaire périphérique chez *Chlorophytum comosum*, en réaction à la restriction de colonisation du substrat (TP1)



nombre d'espèces	575	290	243
amplitude (cm)	612	497	395
min (cm)	3	3	5
max (cm)	615	500	400
médiane (cm)	50	50	60
moyenne (cm)	71	73	75

forêt prairie

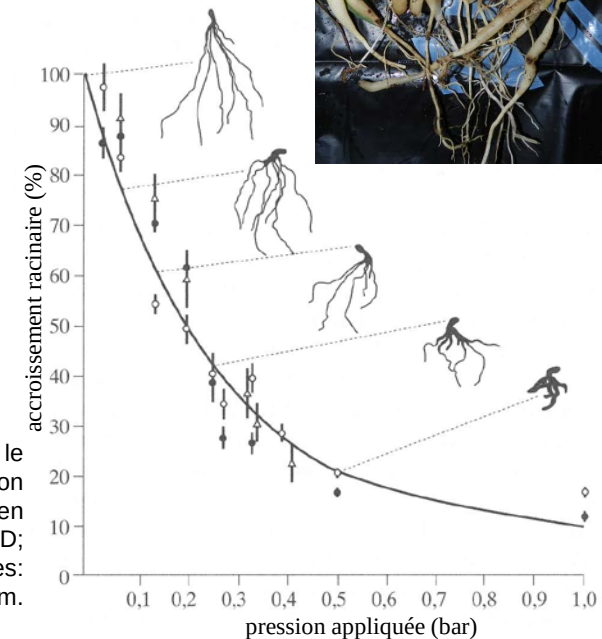


Fig. 4.13. Effets de compactions expérimentales sur le taux relatif d'accroissement racinaire et la déformation des racines chez l'orge, après 6 jours de traitement et en fonction de la taille des pores du sol (moyenne $\pm$ SD; d'après RUSSEL et GRASS 1974). Taille des pores: anneaux: 157 µm; disques: 69 µm; triangles: 16 µm.

4. Enracinement et contraintes environnementales

variation annuelle de la biomasse racinaire

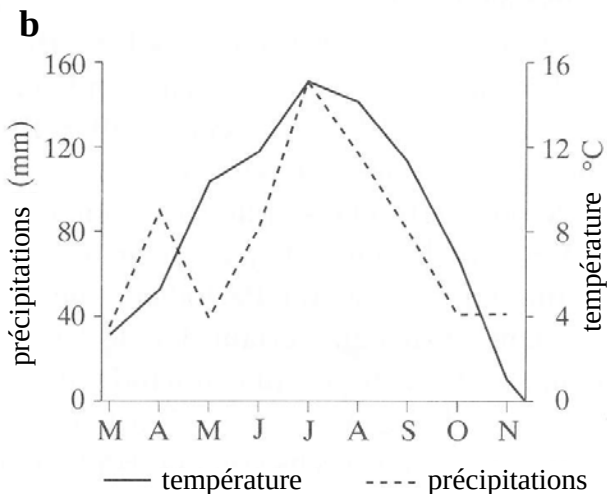
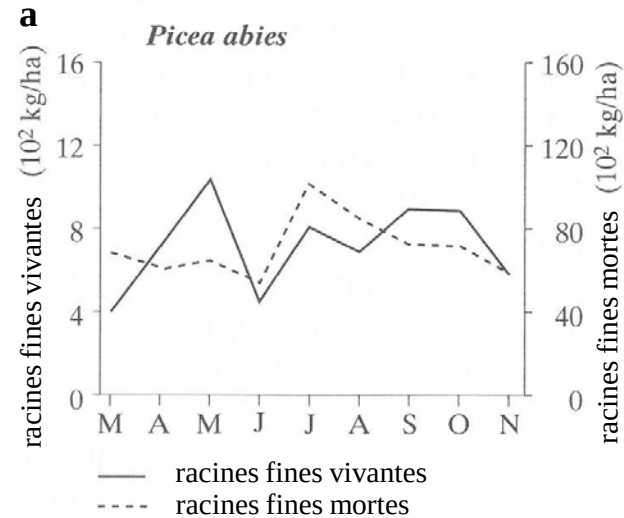


Fig. 5.5. (a) développement mensuel du poids sec de la biomasse racinaire mycorhizienne vivante et morte ($0 < 1$ mm de diamètre) en relation avec la variation saisonnière des précipitations et de la température (b), dans une pessière montagnarde de 90 ans sur sol brun podsolique (Bohême, Tchéquie, 1300 m, d'après KOUCOUREK 1992).

formes d'enracinement et sols zonaux européens

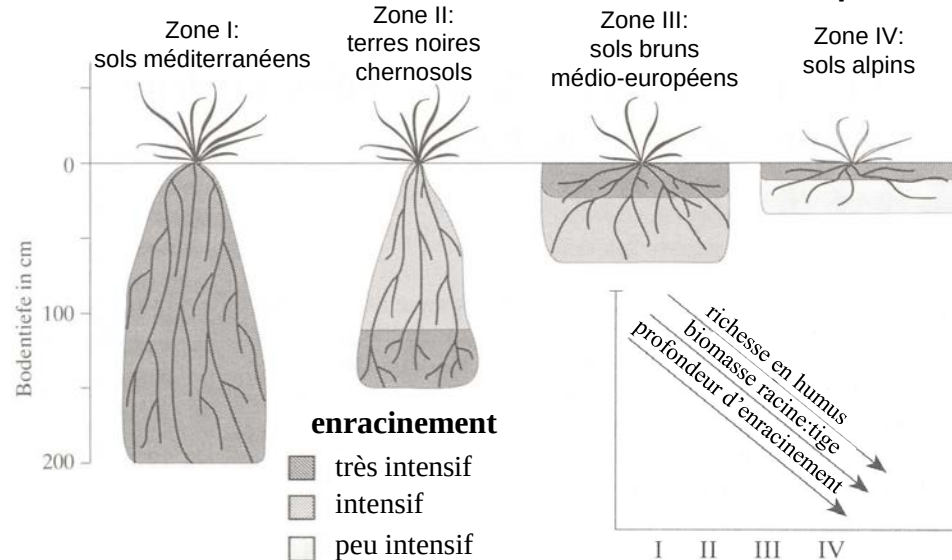
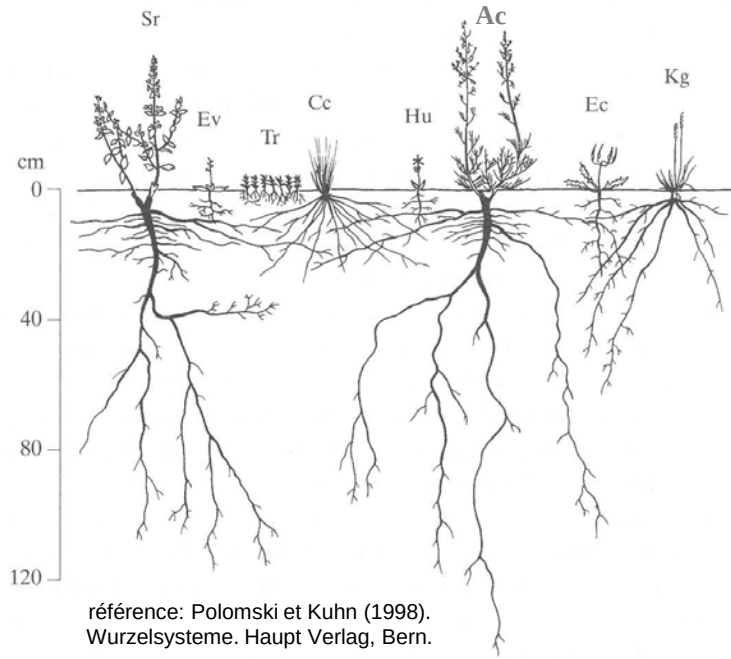


Fig. 7. 1. Représentation schématique des formes d'enracinement dans les sols zonaux européens.



référence: Polomski et Kuhn (1998).
Wurzelsysteme. Haupt Verlag, Bern.



enracinement d'un olivier sur sol méditerranéen profond. Leonidio, Grèce

Formes d'enracinement et écologie des espèces

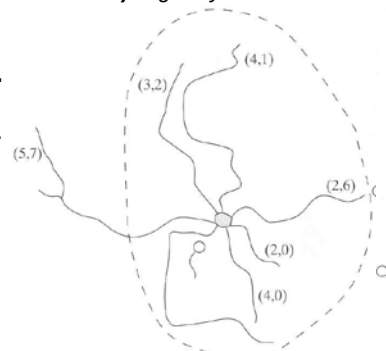
Fig. 7.3. Profil racinaire d'une communauté végétale sur sol sableux dans la plaine du Rhin Supérieur. Les 5 premiers cm, où le sol se dessèche rapidement, ne contiennent pas de racines. Les espèces à enracinement plus ou moins superficiel font partie des espèces à floraison précoce. Les espèces estivales s'enracinent très profondément, là où l'eau disponible leur permet d'achever leur cycle végétatif. (légèrement adapté d'après VOLK 1931). De gauche à droite: *Stachys recta* (Sr), *Erophila verna* (Ev), *Tortula ruralis* (Tr), *Corynephorus canescens* (Cc), *Holosteum umbellatum* (Hu), *Artemisia campestris* (Ac), *Erodium cicutarium* (Ec), *Koeleria glauca* (Kg).

4. Les racines des arbres (1): l'architecture racinaire

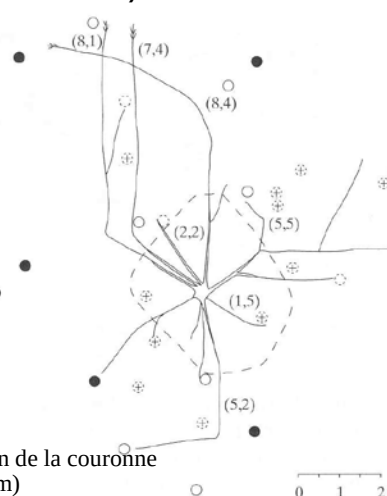
les principaux types architecturaux

extension horizontale du système racinaire

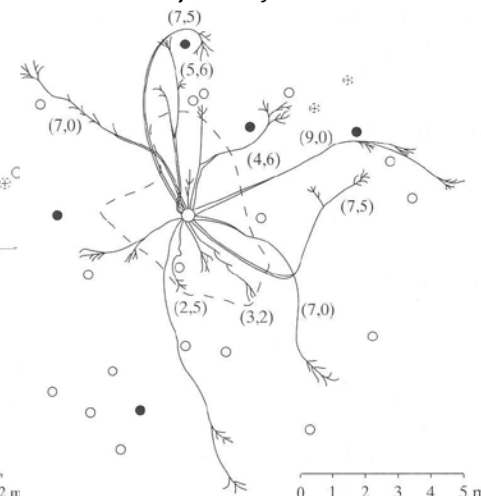
a) *Fagus sylvatica*



b) *Picea abies*



c) *Pinus sylvestris*



○ arbre co-dominant ✱ souche
● arbre dominant - - - projection de la couronne
○ souche () racines (m)

Fig. 10.10. Comparaison de l'extension du système racinaire en fonction de la projection de la couronne chez le hêtre, l'épicéa et le pin sylvestre (d'après HILF 1927). **a)** Hêtre âgé de 70 ans dans un peuplement mélangé de chênes et de mélèzes, sur sol limoneux-sableux: les racines latérales ne dépassent que faiblement l'aire de projection de la couronne, laquelle circonscrit également le domaine de ramification des racines. **b)** Épicéa âgé de 60 ans sur sol limoneux-sableux: des racines latérales prospectent clairement au-delà des arbres avoisinants et de l'aire de projection de la couronne, ne se ramifiant qu'entre le deuxième et le troisième cercle d'arbres voisins. **c)** Pin sylvestre sur sol limoneux-sableux: nonobstant de grandes différences entre individus, 70% à 100% des racines latérales prospectent le sol au-delà de l'aire de projection de la couronne.

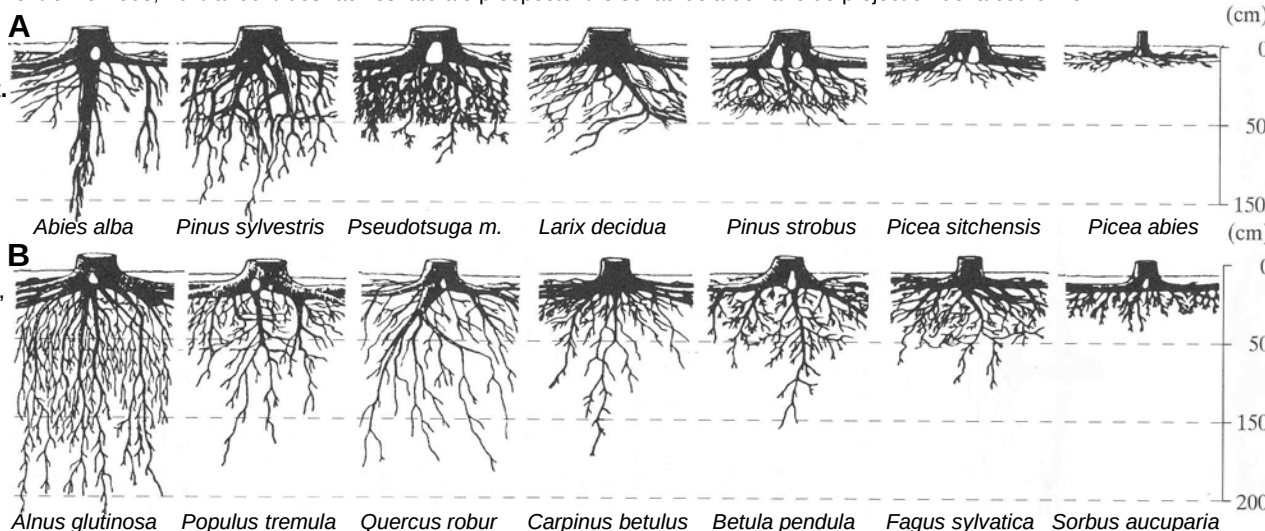


Fig. 10.2 Appareil racinaire de différentes espèces d'arbres croissant dans une forêt bavaroise (Allemagne) sur sols de type pseudogley à humidité partiellement changeante. Précipitations: 800 mm. A. conifères (25-50 ans). B. feuillus 35-38 ans).

1) système racinaire pivotant. Le pivot primaire initial forme l'ossature du système racinaire. Chez tous les jeunes arbres et demeurant à maturité chez: *Abies alba*, *Pinus sylvestris*, *Quercus robur*, *petraea* (jusque vers 50 ans), *Ulmus glabra*.

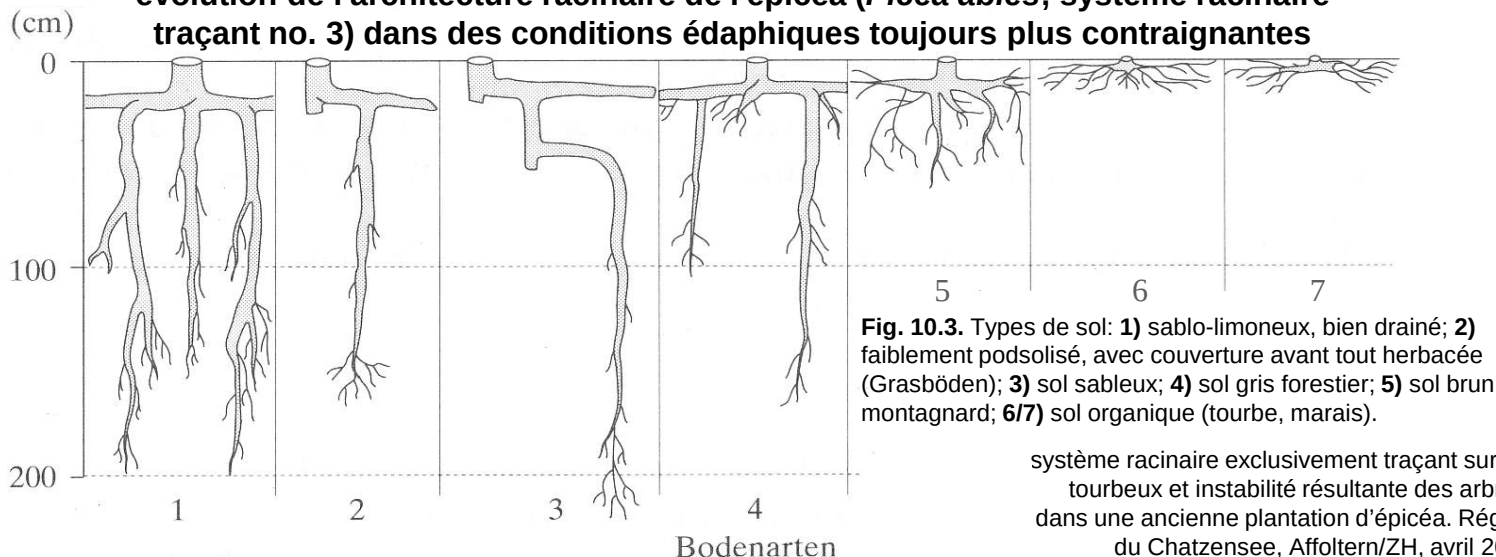
2) système racinaire en coeur. Un réseau de charpentières obliques forme une balle racinaire hémisphérique. Ex.: *Larix decidua*, *Pseudotsuga menziesii*, *Fagus sylvatica*, *Betula pendula*, *Tilia cordata*, *Carpinus betulus*, *Quercus robur*, *petraea* (dès 50 ans), *Alnus glutinosa*, *incana*.

3) système racinaire traçant. Plusieurs charpentières horizontales structurent l'appareil racinaire. Elles sont ancrées dans le sol par leurs racines latérales, majoritairement des pivots secondaires. Ex.: *Picea abies*, *Pinus strobus*, *Sorbus aucuparia*, *Fraxinus exelsior*, *Populus tremula*.

4) système racinaire "en coeur" et traçant. Mélange des systèmes 2 et 3. Ex.: *Acer pseudoplatanus*.

4. Les racines des arbres (2): morphologie et contraintes environnementales

évolution de l'architecture racinaire de l'épicéa (*Picea abies*; système racinaire traçant no. 3) dans des conditions édaphiques toujours plus contraignantes



inhibition de la colonisation par les racines fines des sols hydromorphes et tempérament des espèces arborescentes

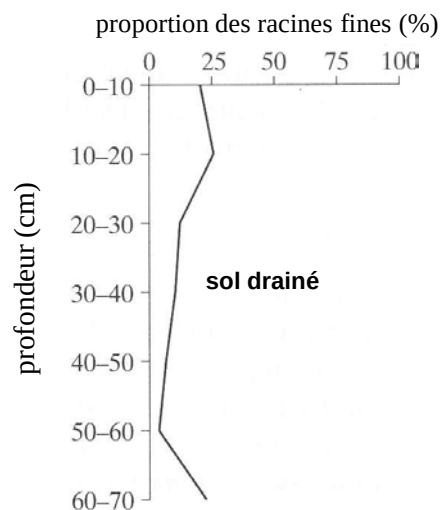


Fig. 11.3. Profondeur d'enracinement des racines fines (diamètre: 0,5-2 mm) d'épicéas croissant sur sols bruns podsolisés, bien drainés et pauvres en squelette de la Forêt Noire.

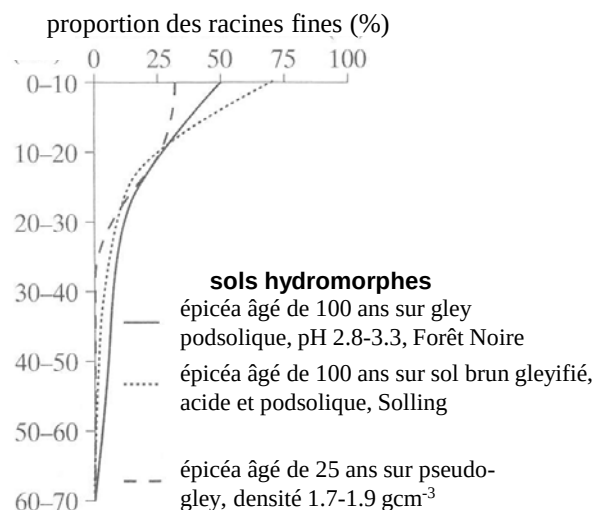


Fig. 11.11. Profondeur d'enracinement des racines fines (diamètre: 0,5-2 mm) d'épicéas croissant sur sols partiellement hydromorphes.

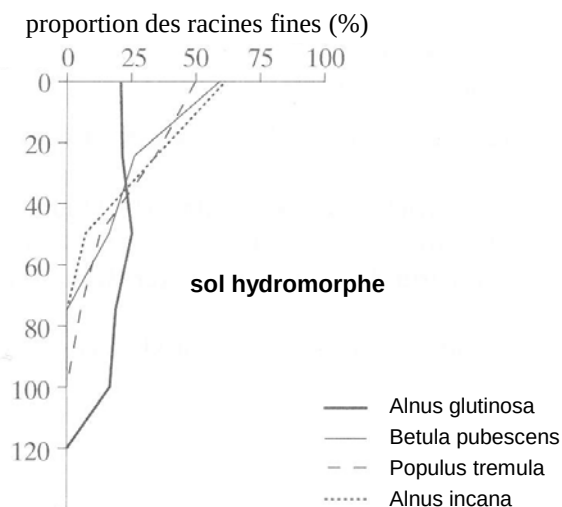


Fig. 11.14. Profondeur d'enracinement des racines fines (diamètre: 0,5-2 mm) d'essences feuillues croissant sur des sols hydromorphes à pseudo-gley, en Bavière.

4. Encart no. 24: les anastomoses racinaires: de l'arbre sujet à l'arbre forêt



Groupe de hêtres avec anastomose de leurs systèmes racinaires (Plateau suisse)

Les arbres d'un peuplement tendent à former un collectif par la formation d'anastomoses reliant les systèmes racinaires d'individus appartenant à une ou plusieurs espèces. Ces fusions de racines permettent des échanges de nutriments et d'assimilats entre les arbres, indépendamment de l'espèce. Cette collectivisation végétale assure un meilleur partage des ressources édaphiques et restreint la concurrence intra- et interspécifique. Elle a un effet bénéfique à l'échelle du peuplement, en augmentant la stabilité globale de la strate arborée, particulièrement dans le cas de conditions stationnelles limitantes et de sols superficiels.



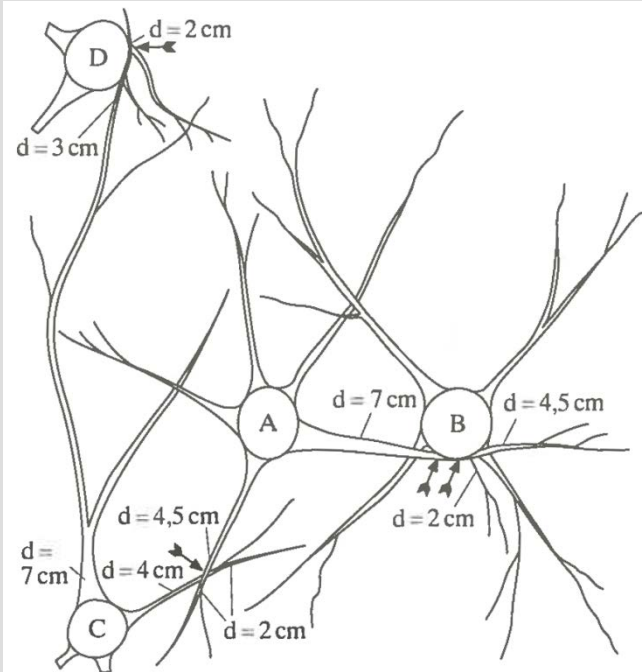
Anastomoses inter-spécifiques (flèches) entre un érable plane et un érable sycomore dans une hêtraie du Plateau suisse.

Quelques faits caractéristiques des anastomoses racinaires:

- interconnexion typiquement de 2-11 arbres
- plus grande fréquence chez les arbres à enracinement traçant
- fréquence variable d'une espèce d'arbre à l'autre; les anastomoses sont particulièrement fréquentes chez le sapin blanc
- augmentation de la fréquence des anastomoses avec l'âge du peuplement
- plus grande fréquence sur les sols superficiels.

Souche de sapin blanc alimentée, après abattage, par ses anastomoses racinaires avec les arbres avoisinants (Plateau suisse)

référence: Polomski et Kuhn (1998).
Wurzelsysteme. Haupt Verlag, Bern.



Distribution et fréquence des anastomoses racinaires (flèches) dans une pinède du sud de la Russie.



4. Références

Remarque : les micrographies non référencées proviennent des activités de recherche passées et en cours de notre laboratoire de microscopie au WSL.

Principaux ouvrages et articles de référence utilisés:

Agerer, R., 2001. Exploration types of ectomycorrhizae. A proposal to classify ectomycorrhizal mycelial systems according to their patterns of differentiation and putative ecological importance. *Mycorrhiza* 11, 107-114.

Deysson, G., 1978. Organisation et classification des plantes vasculaires. Sedes, Paris.

Egli, S., Brunner, I., 2002. Les mycorhizes. Notice pour le praticien ISSN 1012-6554. WSL, CH8903 Birmensdorf.

Eschrich, W., 1995. Funktionelle Pflanzenanatomie. Springer, Berlin.

Garbaye, J., 2013. La symbiose mycorhizienne. Une symbiose entre les plantes et les champignons. Éditions Quae, Versailles

Gunning, B.E.S., Steer, M.W., 1996. Plant cell biology. Jones & Bartlett Publishers, Sundbury Massachusetts.

Lüttge, U., Kluge, M., Bauer, G., 2002. Botanique 3. édition. Éditions Tec et Doc / Lavoisier.

Marschner, H., 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic press. Harcourt Brace & Company, Publishers, London.

Polek, M., 2014. Site recovery in the Zn-Pb mine of Olkusz, Poland, as shown by changes in the soil properties, nematode communities and plant tolerance. Maîtrise universitaire ès Sciences en biogéosciences, Université de Lausanne.

Polonski, J., Kuhn, N., 1998. Wurzelsysteme. Paul Haupt Verlag, Bern.

Whiteside, M.D., Treseder, K.K., Atsatt, P.R., 2009. The brighter side of soils: quantum dots track organic nitrogen through fungi and plants. *Ecology* 90, 100-108.