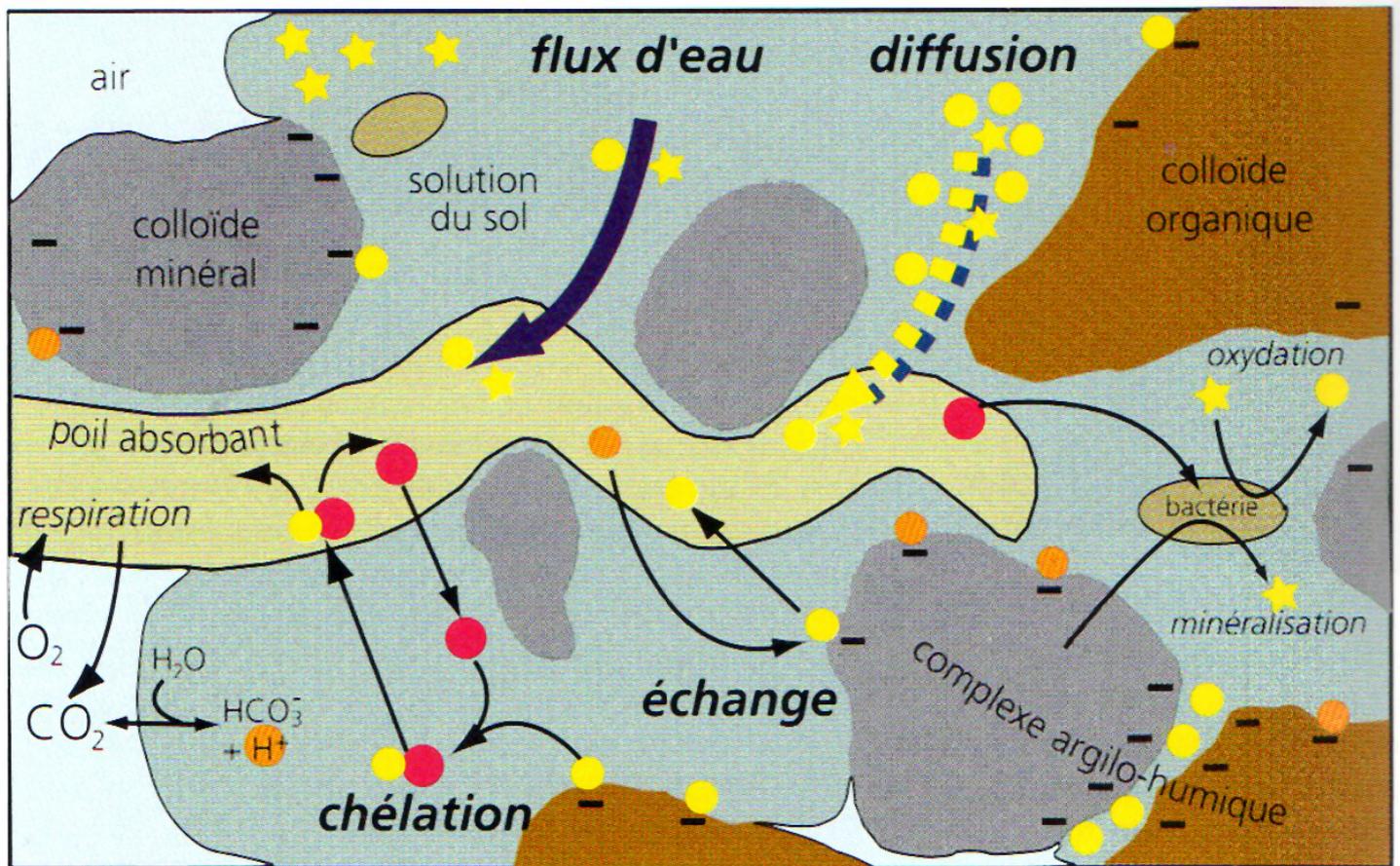


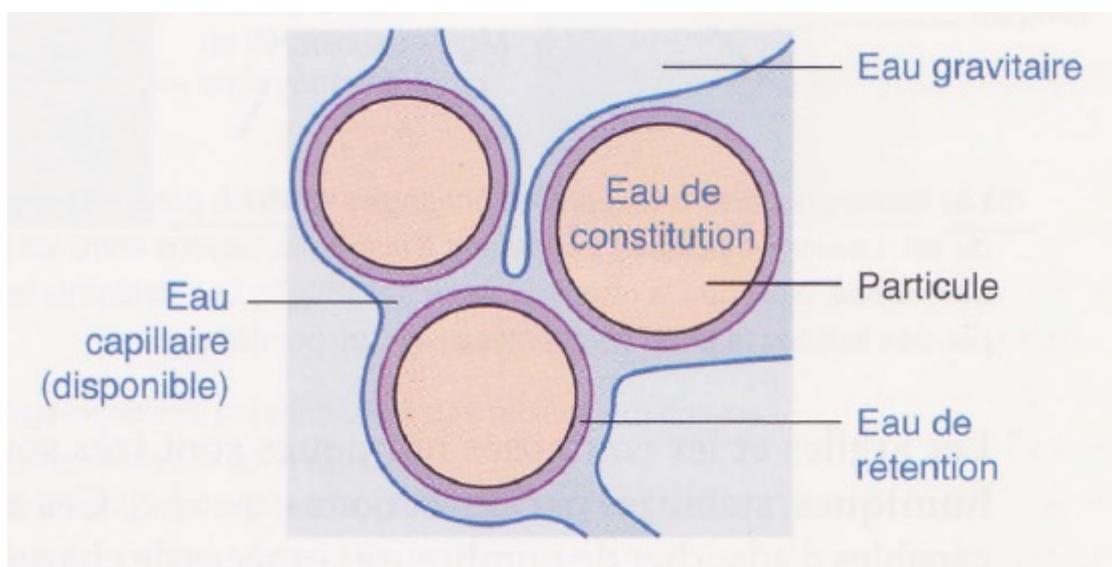
ABSORPTION D'EAU ET D'IONS DANS LE MILIEU DE VIE

DOC 1 – PORTION DE RHIZOSPHERE MONTRANT LES CONSTITUANTS D'UN SOL ET LES ECHANGES ENTRE UN POIL ABSORBANT ET LE SOL (Meyer)



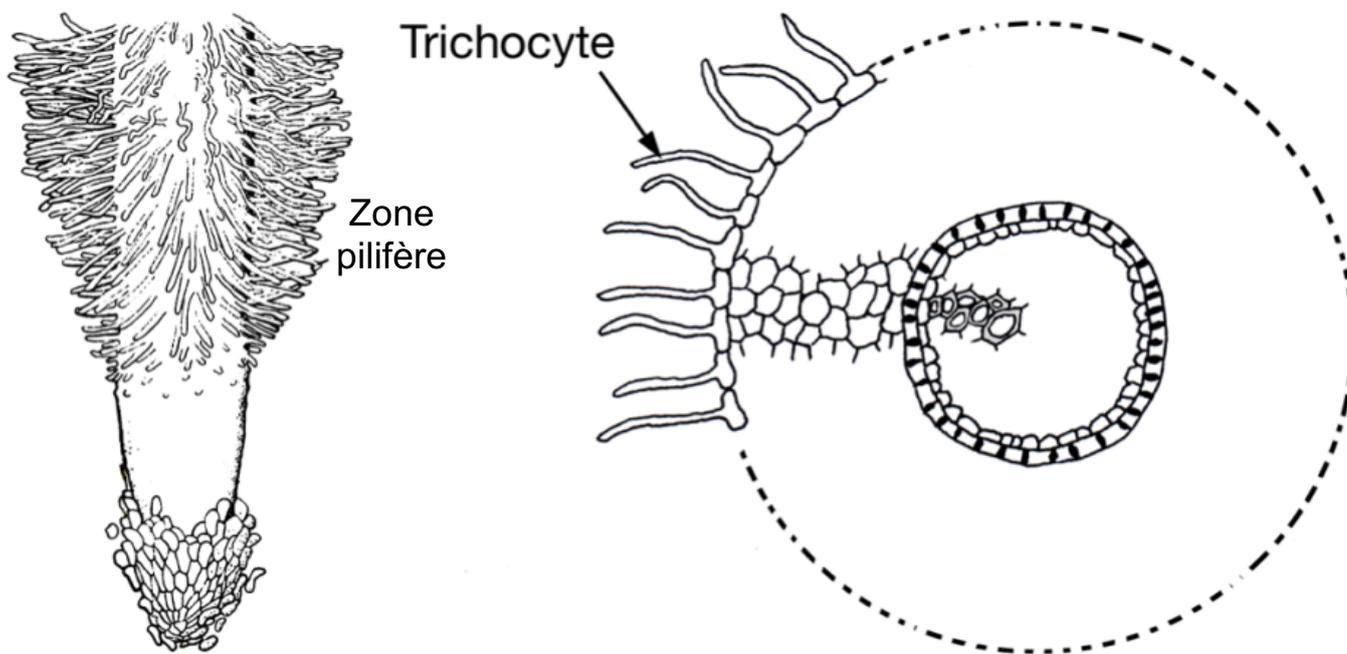
● acide organique ● H⁺ Nutriments : ★ anions ● cations

DOC 2 – LES DIFFERENTS ETATS DE L'EAU DANS LE SOL (Segarra)

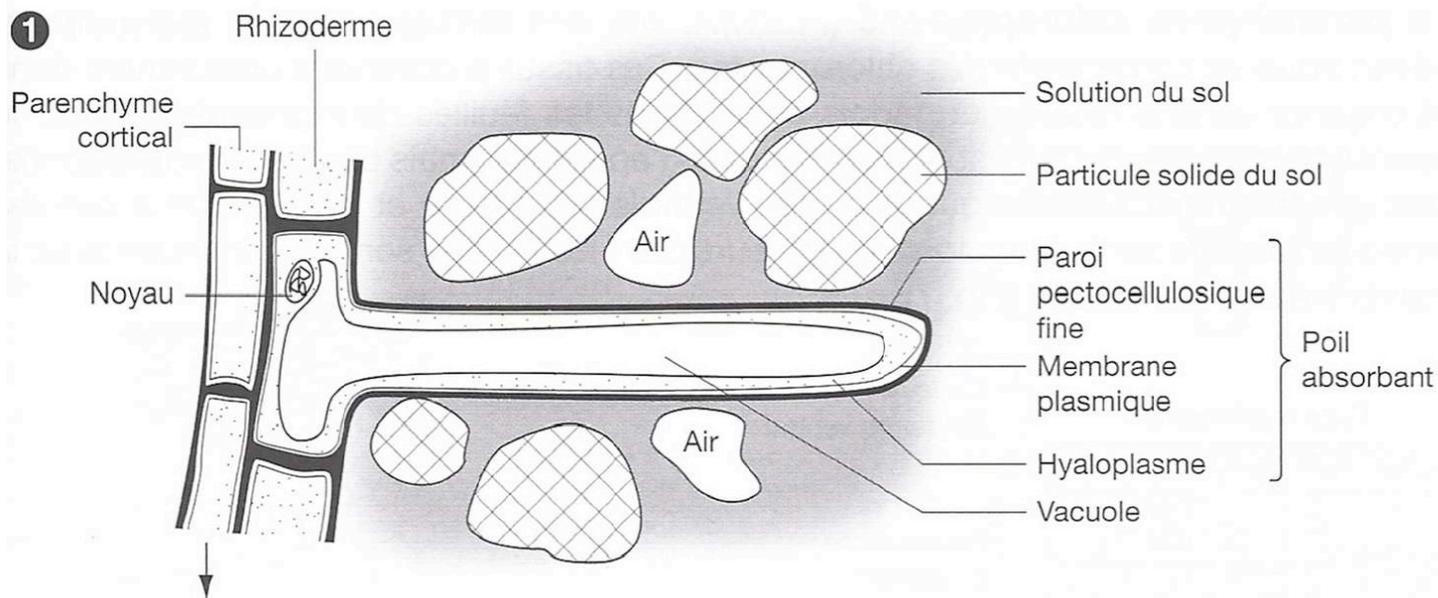


DOC 3 – LES SURFACES D’ECHANGE SPECIALISEES DANS L’ABSORPTION RACINAIRE

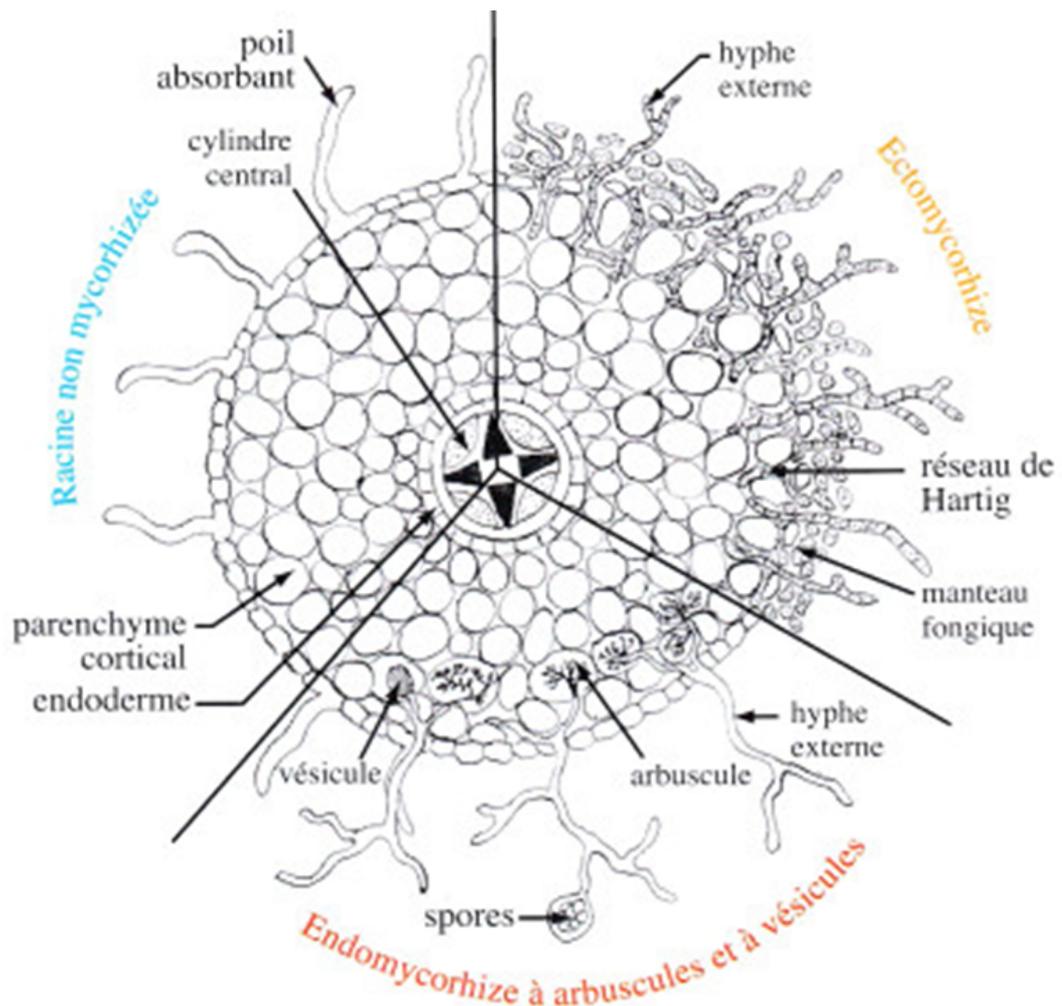
LOCALISATION DES TRICHOCYTES OU POILS ABSORBANTS SUR UNE RACINE



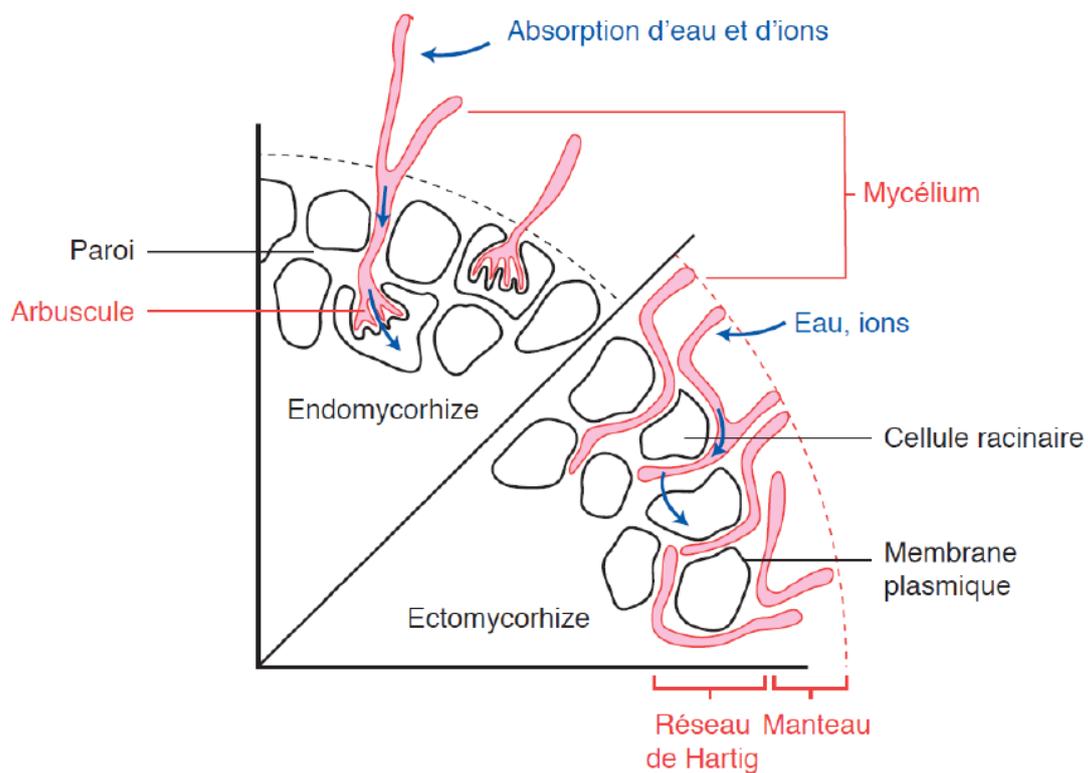
RELATION STRUCTURE FONCTION D’UN POIL ABSORBANT (Breuil 2007)



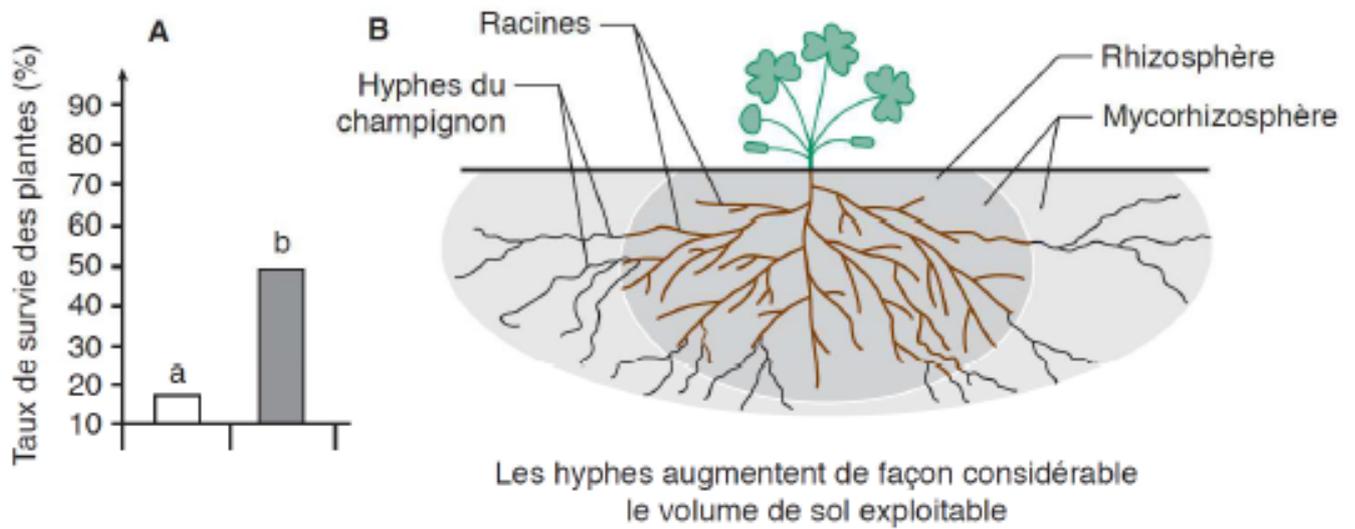
DOC 4 – ORGANISATION DES MYCORHIZES (Meyer ; Segarra)



Section transversale d'une racine de dicotylédone comparant les deux principaux types de mycorhize.



DOC 5 – AUGMENTATION DE L'EXPLOITATION DES RESSOURCES DU SOL PAR LES MYCORHIZES (Segarra, Meyer)



A. Taux de survie d'individus de *Festuca eskia* soumises à un stress hydrique
En blanc: Fétuque non mycorhizée ; en noir fétuque mycorhizée
(d'après Gibert A. et Hazard L. (2011) *Journal of Plant Ecology* **4**, 201-208)
B. Hyphes et augmentation du volume de sol exploré

VUE D'ENSEMBLE

L'ABSORPTION MINÉRALE EST FAVORISÉE PAR LES MYCORHIZES

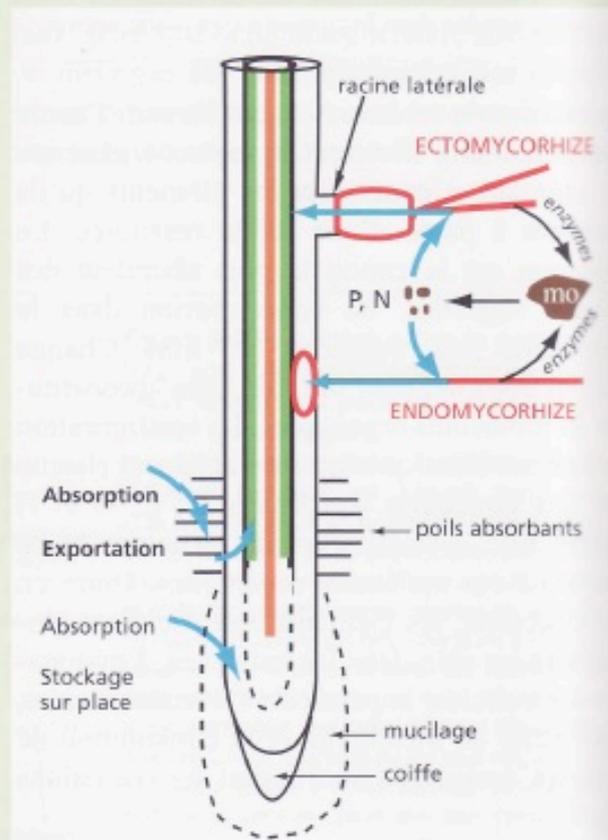
Différentes mycorhizes ont été présentées au chapitre 2. Leurs rôles dans la nutrition du végétal sont considérés ci-dessous.

■ **Le champignon augmente la surface d'absorption des racines**

Comme le souligne Selosse (2000), les mycorhizes sont plus fréquentes dans la nature que les poils absorbants : la véritable surface d'échange impliquée dans la nutrition hydrominérale du végétal est donc celle des champignons au contact du sol. Elles augmentent la surface d'absorption des racines d'un facteur 100 ou plus. Le végétal mycorhizé ne construit pas un grand réseau de fines racines. À capacité d'absorption égale, un végétal mycorhizé aura une biomasse racinaire plus réduite que celle d'un végétal non mycorhizé. Les ectomycorhizes peuvent se maintenir trois ans et, par conséquent, assurer un système actif d'absorption sur les racines lignifiées.

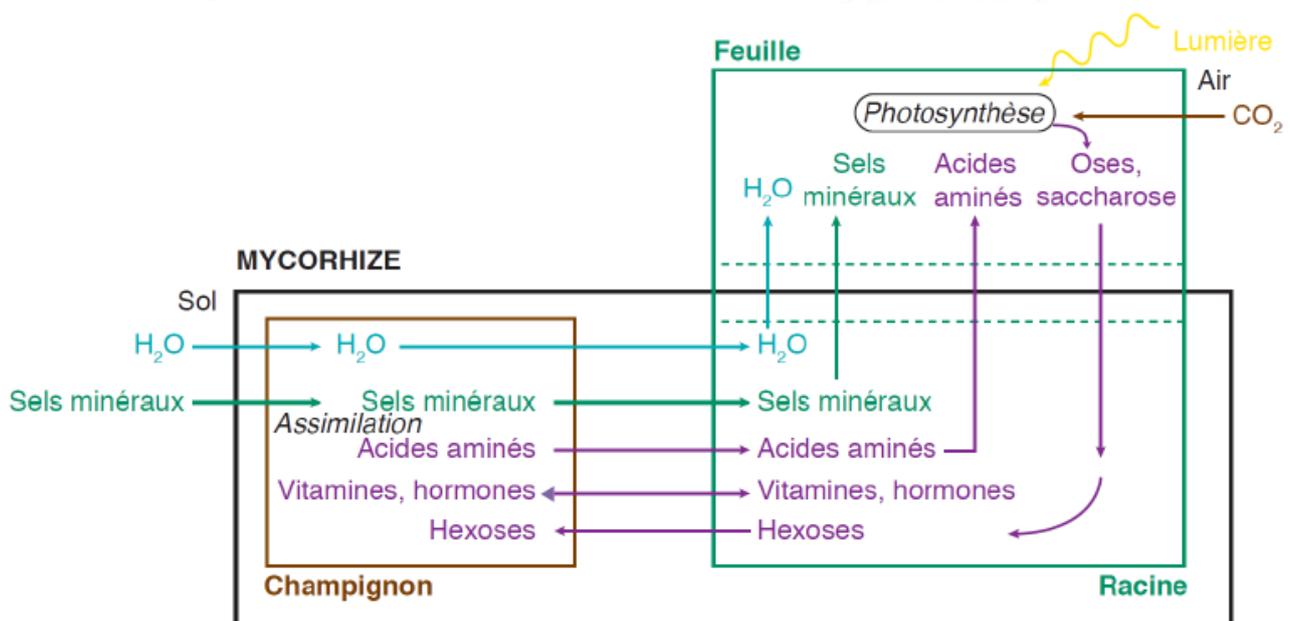
■ **Le champignon augmente l'exploitation des ressources du sol par les racines**

Des expériences de marquages radioactifs mettent en évidence que les nutriments absorbés par le champignon accèdent à la racine. Le champignon joue un rôle important dans l'absorption du phosphate (nutriment le plus immobile du sol) et favorise celle de l'azote, du potassium, du zinc, du cuivre et de l'eau. Il permet aux racines d'exploiter



Sites d'absorption des nutriments à l'extrémité d'une racine
 mo : matière organique ; N : acides aminés ; P : phosphate (H_2PO_4)

DOC 6 – LES MYCORHIZES : UNE SYMBIOSE FONDÉE SUR DE NOMBREUX ÉCHANGES ENTRE LES 2 PROTAGONISTES (Segarra)

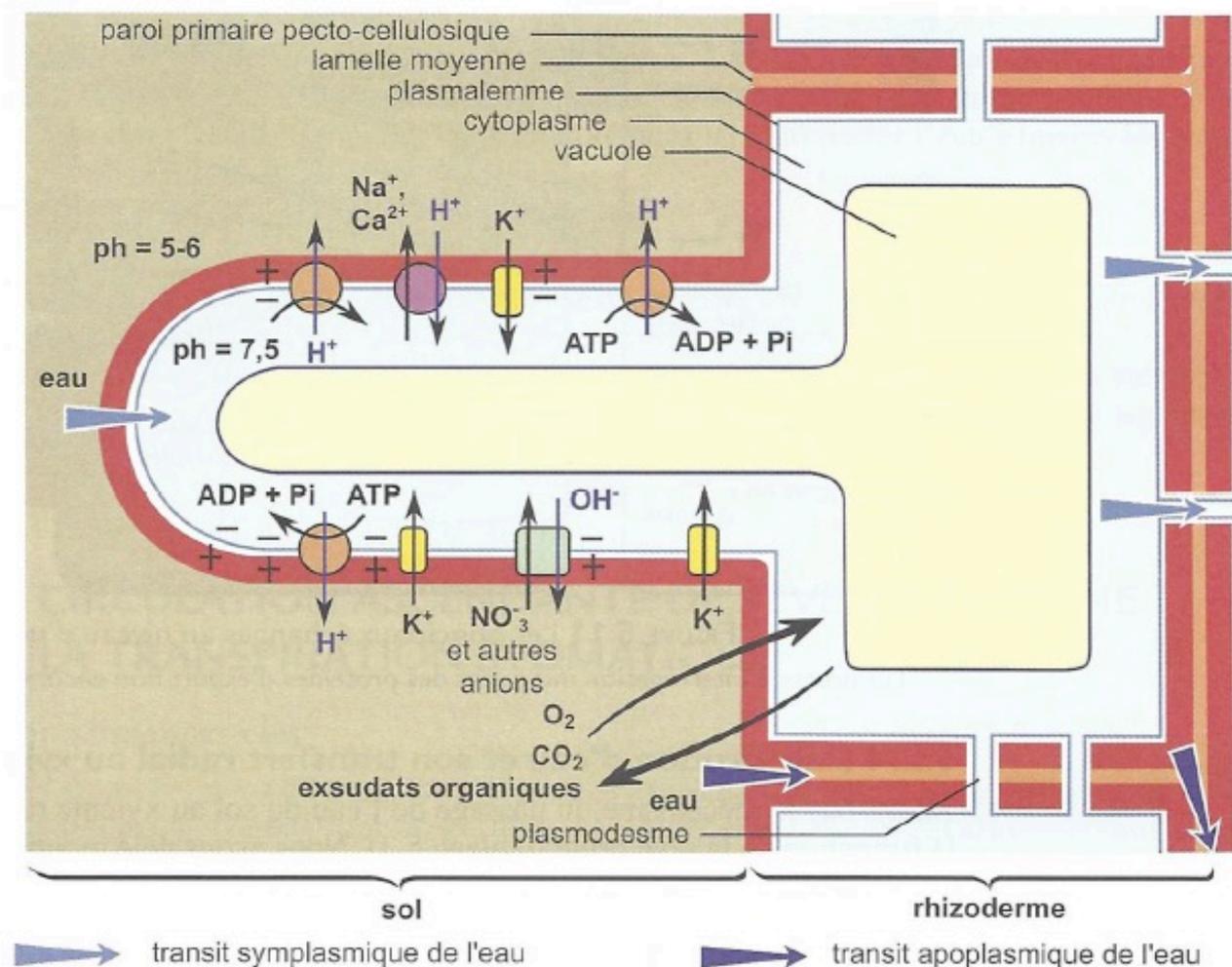


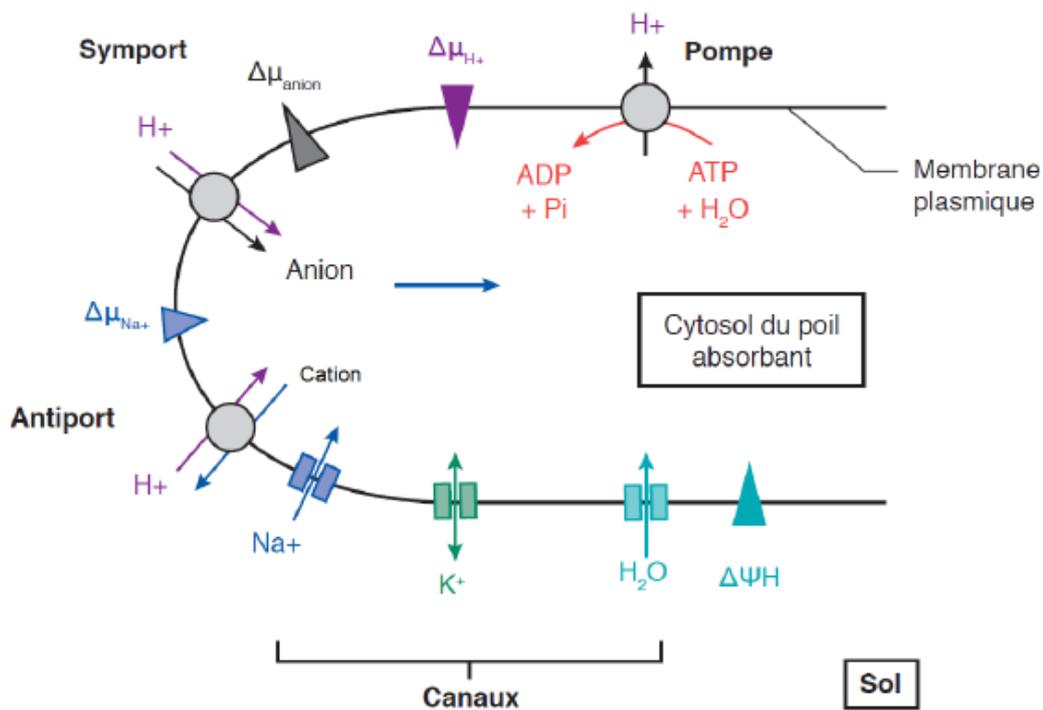
DOC 7 – MECANISMES D'ABSORPTION IONIQUE RACINAIRE (Hopkins, Breuil)

Les concentrations ioniques intracellulaires de cellules racinaires ont été comparées avec celles prédites d'après l'équation de Nernst (connaissant les concentrations ioniques extracellulaires et le potentiel de membrane, ici -110 mV, cellule de pois).

Question : en comparant les concentrations intracellulaires calculées et observées, déterminer le mécanisme d'échange transmembranaire pour chaque ion.

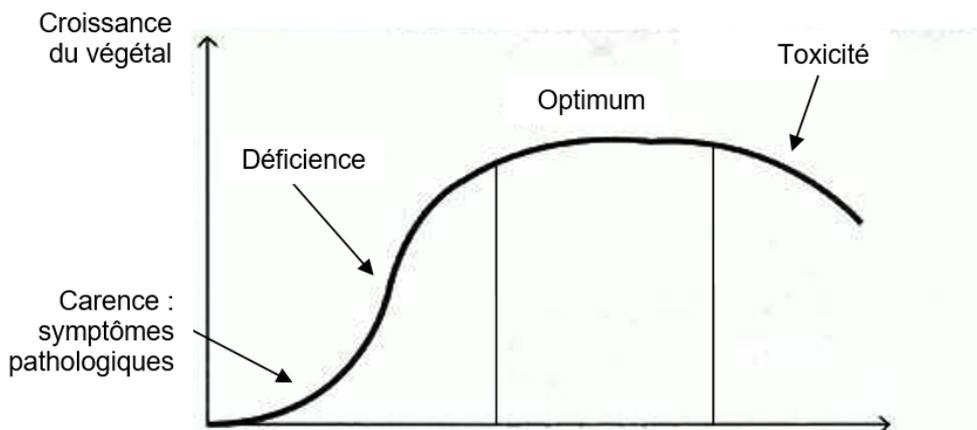
Ion	Concentration dans le milieu extérieur (mmol.L ⁻¹)	Concentration calculée dans le milieu intracellulaire (mmol.L ⁻¹)	Concentration observée dans le milieu intracellulaire (mmol.L ⁻¹)	Mécanisme d'échange transmembranaire
K ⁺	1	74	75	
Na ⁺	1	74	8	
Mg ²⁺	0,25	1 340	3	
Ca ²⁺	1	5 360	2	
NO ₃ ⁻	2	0,0272	28	
Cl ⁻	1	0,0136	7	
H ₂ PO ₄ ⁻	1	0,0136	21	
SO ₄ ²⁻	0,25	0,00005	19	

DOC 8 – MODALITES DE TRANSPORT DES IONS AU NIVEAU DES POILS ABSORBANTS DES RACINES (Peycru, Segarra)



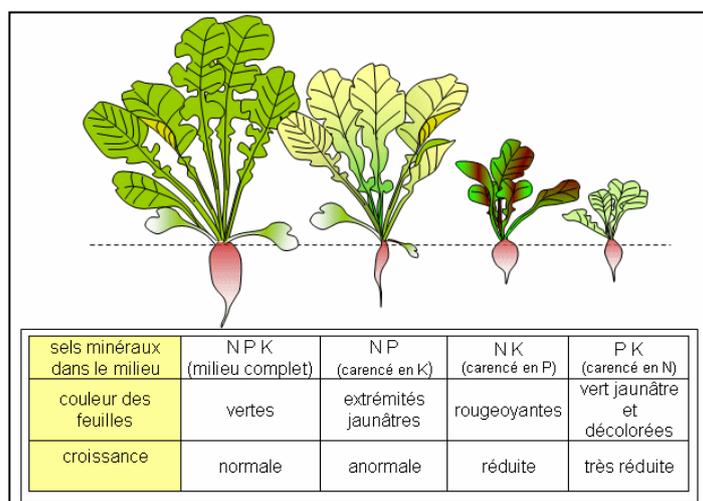
DOC 9 - RESSOURCES MINERALES ET CROISSANCE VEGETALE

Effet de la concentration en un élément chimique donné sur la croissance d'une plante



Concentration de l'élément chimique

Culture du radis sur divers milieux carencés



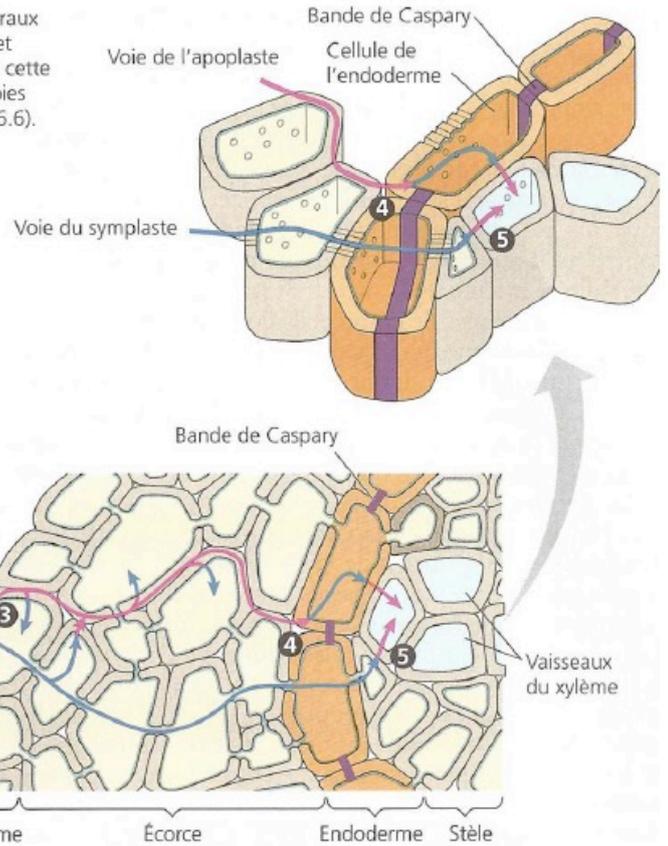
sels minéraux dans le milieu	NPK (milieu complet)	NP (carencé en K)	NK (carencé en P)	PK (carencé en N)
couleur des feuilles	vertes	extrémités jaunâtres	rougeoyantes	vert jaunâtre et décolorées
croissance	normale	anormale	réduite	très réduite

DOC 10 – TRANSFERT RADIAL DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE (Campbell)

Transport radial des minéraux et de l'eau dans les racines. Les minéraux dissous sont absorbés par la surface des racines, en particulier par les poils absorbants et les mycorhizes (association mutualiste de racines et de champignons, non illustrée dans cette figure). L'eau et les minéraux traversent ensuite l'écorce, en empruntant à la fois des voies de l'apoplaste et des voies du symplaste, pour se rendre jusqu'à la stèle (voir la FIGURE 36.6).

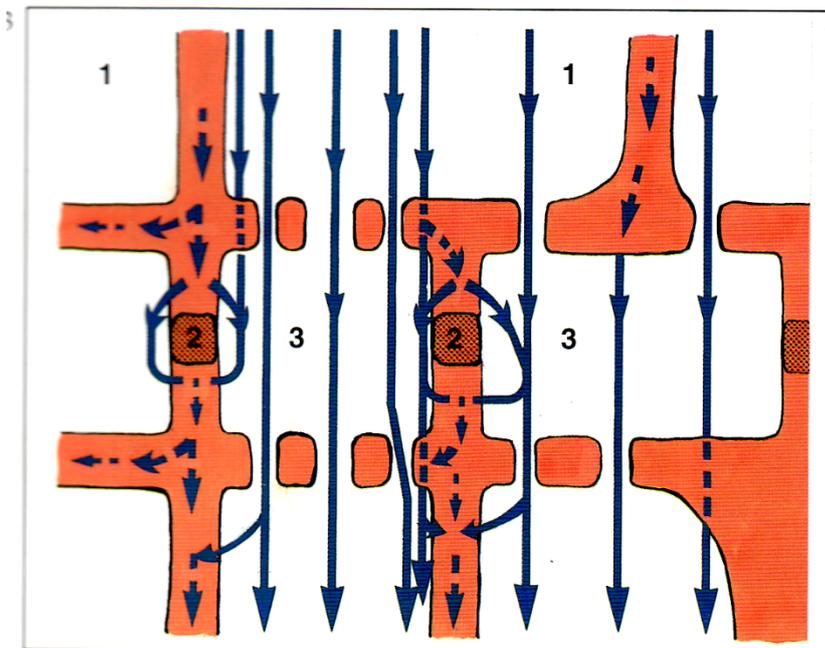
- 1 La paroi hydrophile des cellules de l'épiderme permet l'entrée de la solution du sol et ouvre la voie de l'apoplaste. L'eau et les minéraux peuvent pénétrer dans l'écorce en suivant cet ensemble de parois cellulaires reliées les unes aux autres.
- 2 L'eau et les minéraux qui traversent la membrane plasmique des poils absorbants pénètrent dans le symplaste.
- 3 Tandis que la solution du sol circule dans l'apoplaste, certaines molécules d'eau et de minéraux passent dans les cellules de l'épiderme et de l'écorce, et se déplacent ensuite vers l'intérieur en empruntant la voie du symplaste.

- 4 L'eau et les minéraux qui circulent en direction de l'endoderme dans les parois cellulaires de l'apoplaste ne peuvent pénétrer dans la stèle par la même voie. Il y a, dans la paroi de chaque cellule endodermique, une ceinture constituée d'une substance cireuse, la bande de Caspary (représentée ici par la bande de couleur bourgogne). Cette ceinture bloque le passage de l'eau et des minéraux dissous. Seuls les minéraux dissous qui se trouvent déjà dans le symplaste ou qui empruntent cette voie en traversant la membrane plasmique d'une cellule endodermique peuvent éviter la bande de Caspary et aller dans la stèle.



- 5 Les cellules endodermiques et les cellules parenchymateuses de la stèle font passer l'eau et les minéraux dans leur paroi (apoplaste). Comme les éléments de vaisseau du xylème sont des cellules mortes, leur paroi et leur cavité interne font partie de l'apoplaste. Les vaisseaux du xylème transportent ainsi l'eau et les minéraux jusque dans le système caulinaire.

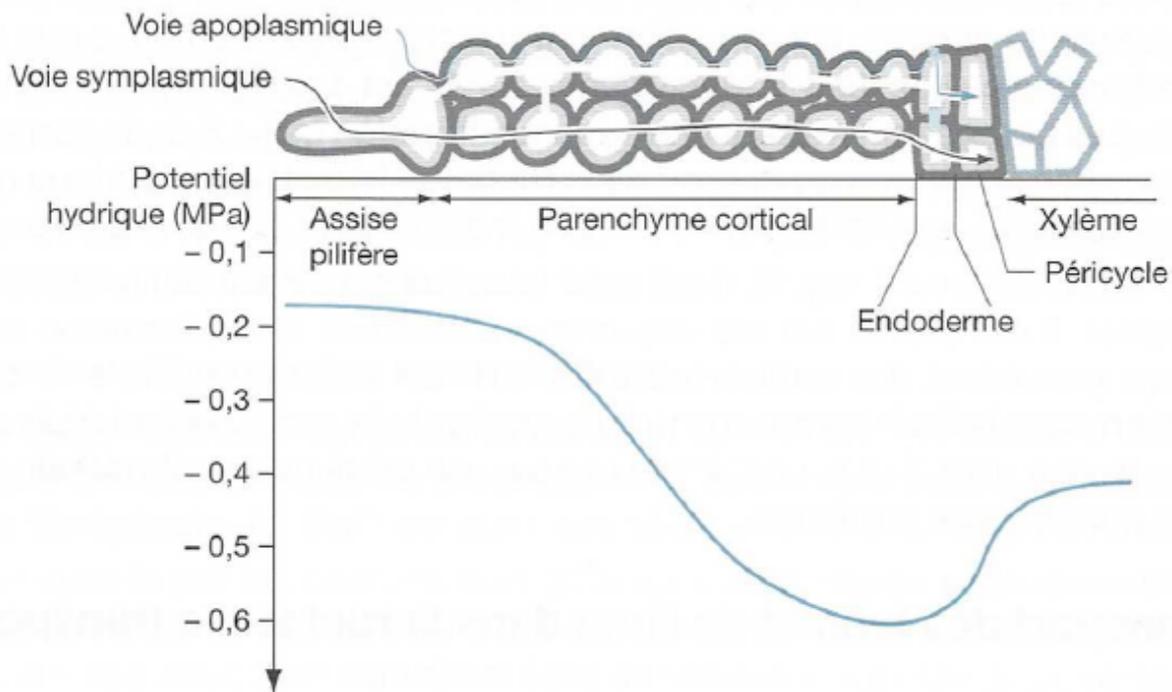
Détail au niveau de l'endoderme : (Camefort)



4.33 Schéma représentant le transport de l'eau et des solutés au travers du jeune endoderme. La circulation depuis le substrat jusque dans le cortex (1) est aussi bien apoplastique (flèches en pointillé) que symplastique (flèches pleines). En revanche, les bandes de Caspary imperméables (2) des parois radiales de l'endoderme empêchent la translocation apoplastique. Par conséquent, celle-ci doit s'effectuer par le protoplaste (3), mais elle peut ensuite gagner le cylindre conducteur par voie symplastique, en empruntant les plasmodesmes, ou apoplastique.

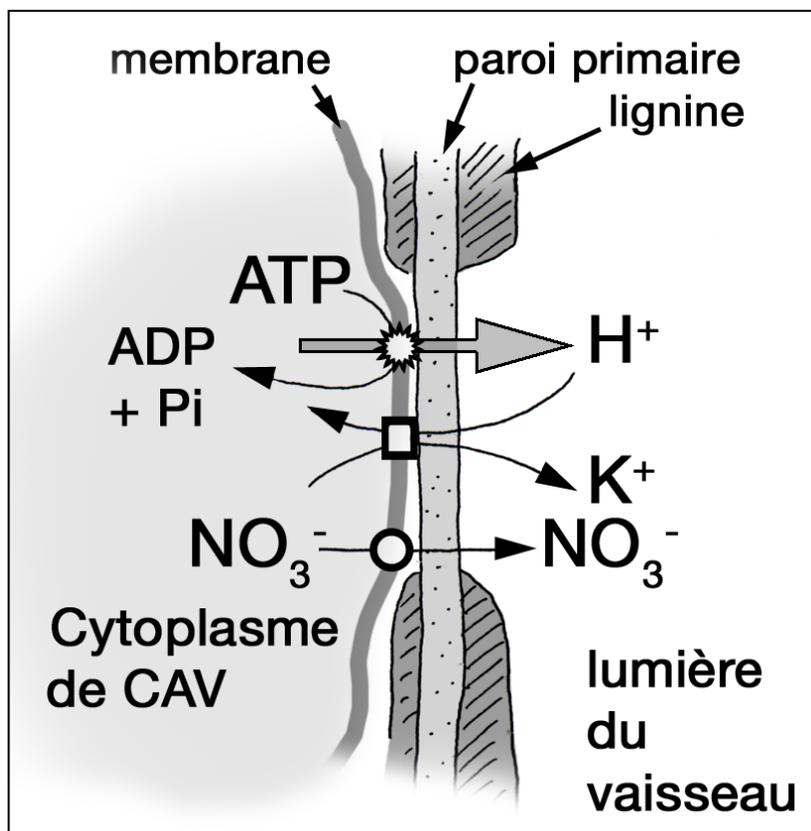
- 1 Cortex
- 2 Bandes de Caspary
- 3 Protoplastes endodermiques

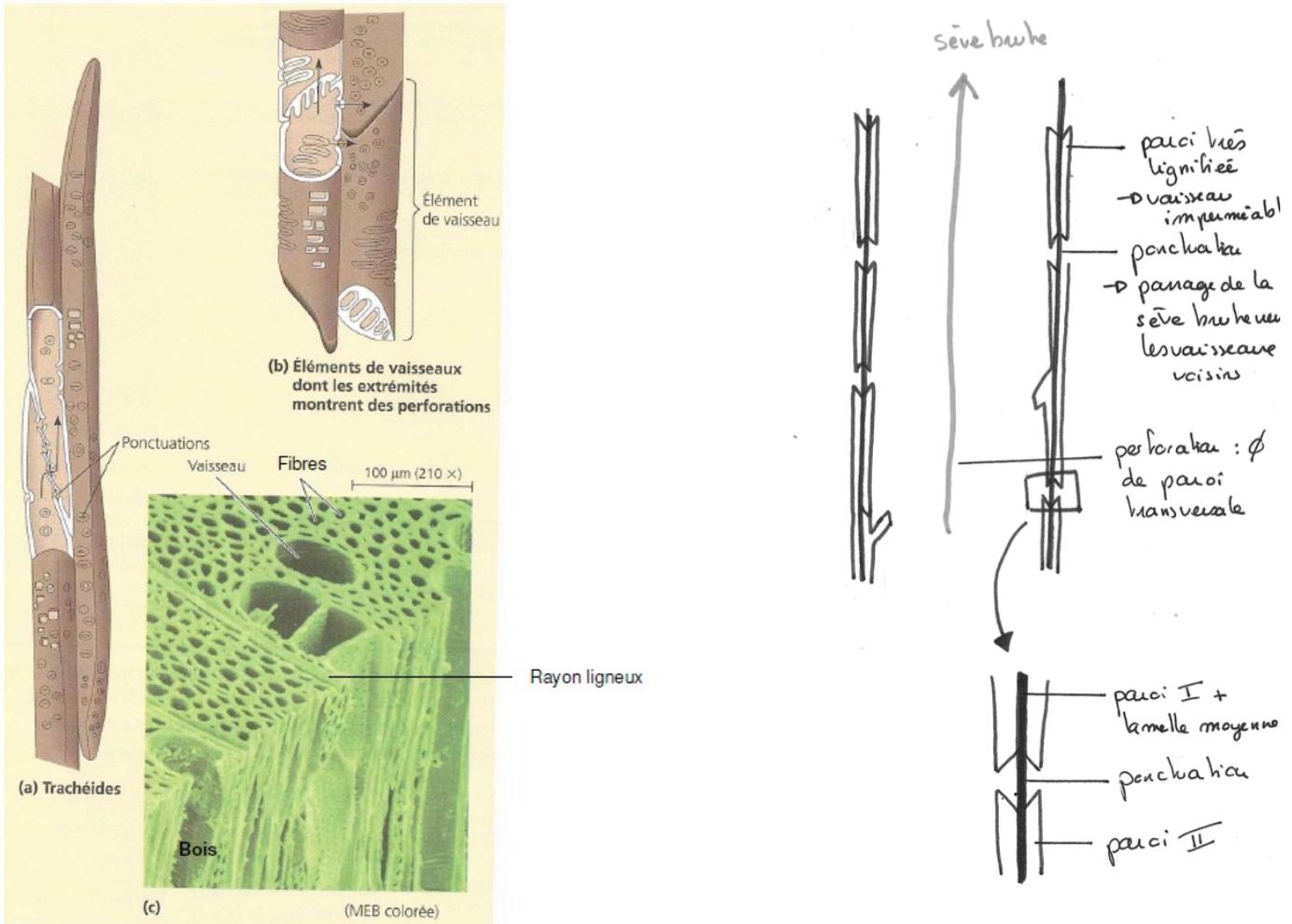
DOC 11 – GRADIENT DE POTENTIEL HYDRIQUE (COMPOSANTE OSMOTIQUE UNIQUEMENT) DANS LA RACINE
(Breuil)



Gradient du potentiel hydrique entre le sol et la racine

DOC 12 – CHARGE DE LA SEVRE BRUTE DANS LE XYLEME



DOC 13 – RELATION STRUCTURE / FONCTION DES ELEMENTS DE VAISSEAU DU XYLEME (Campbell)

Les **trachéïdes** sont des cellules mortes qu'on trouve essentiellement dans le protoxylème du xylème I, de petite taille et qui présentent uniquement des **punctuations** (interruptions de la lignification pariétale) assurant le passage de la sève brute ; elles sont beaucoup plus rares voire absentes dans le xylème II (= bois) chez les Angiospermes.

Les **vaisseaux ou éléments de vaisseaux au sens strict** sont des cellules mortes de plus gros calibre où se trouvent des zones sans lignine qu'on appelle **punctuations** et dont les parois transversales sont pourvues d'importantes **perforations**. On les trouve dans le métaxylème et dans le xylème II (= bois).

Les épaisissements lignifiés déposés sur la paroi intérieure composent des **ornementations variées** permettant de distinguer des structures **annelées, spiralées, rayées, réticulées ou ponctuées**.

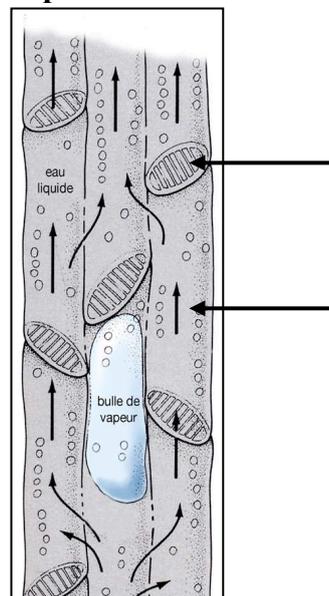
PHENOMENE DE CAVITATION ET CONTOURNEMENT PAR LES PUNCTUATIONS

Embolie : La montée de la sève brute est rendue possible par la grande cohésion existant entre les molécules d'eau.

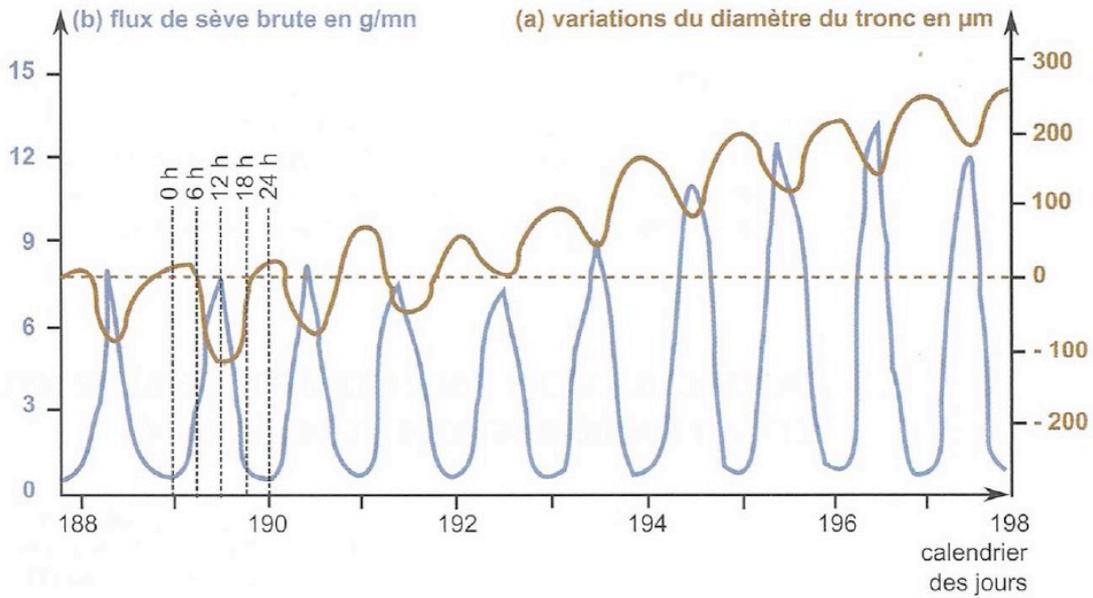
En cas d'embolie, cette cohésion est rompue et la montée de sève est affectée.

Mais l'impact de cette cavitation est limité par l'organisation structurale du xylème :

- La sève contourne la bulle par les **punctuations** latérales et rejoint les vaisseaux voisins.
- Les vaisseaux n'ont pas une longueur infinie, leurs extrémités sont constituées de **perforation** de plus petite taille qui empêche la bulle de monter.



DOC 14 – VARIATIONS JOURNALIÈRES DU FLUX DE SEVE BRUTE ET DU DIAMÈTRE DU TRONC (Peycru)



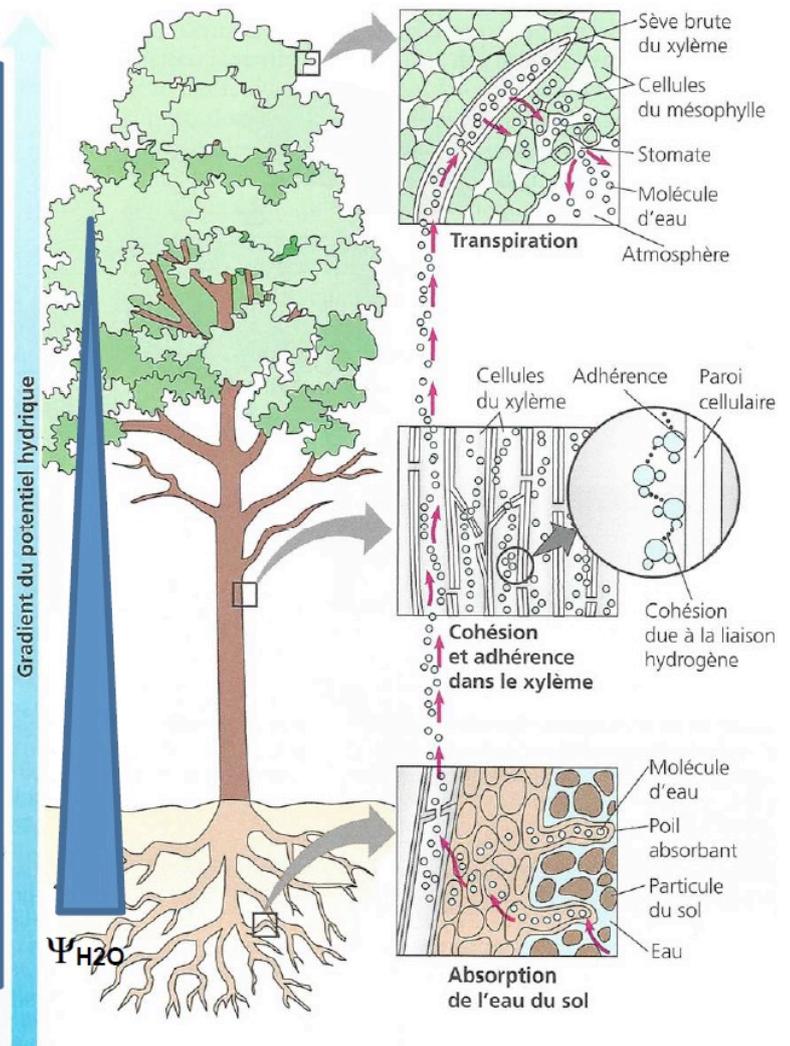
Variations du diamètre de la tige au cours du temps (a) et du flux de sève brute (b).

DOC 15 – GRADIENT DE POTENTIEL HYDRIQUE DU SOL A L'ATMOSPHERE : UN CONTINUUM (Campbell)

Ascension de l'eau dans un arbre. Les liaisons hydrogène permettent la formation d'une chaîne continue de molécules d'eau qui s'étend des feuilles jusqu'au sol. La force qui fait monter la sève brute dans le xylème est créée par un gradient de potentiel hydrique (ψ). Dans le cas du courant de masse sur longue distance, le gradient de ψ est principalement dû au gradient de potentiel de pression (ψ_p). La transpiration provoque une diminution du ψ_p de l'extrémité du xylème qui se trouve dans la feuille. Ce ψ_p est alors inférieur au ψ_p de l'extrémité située dans la racine.

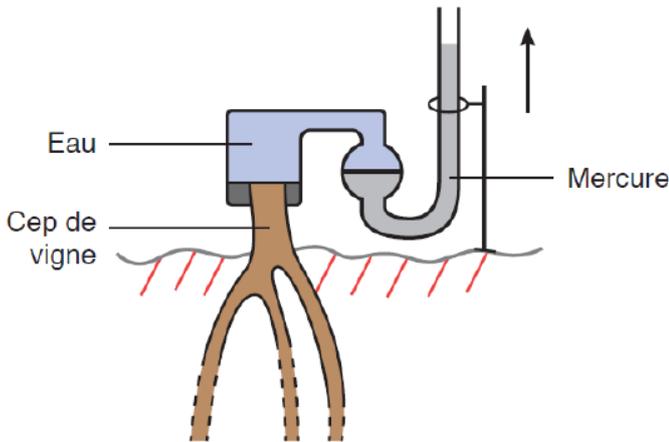
Valeurs à connaître >>

- ψ de l'air extérieur = -10,0 à -100,0 MPa
- ψ de la feuille (lacunes) = -7,0 MPa
- ψ de la feuille (parois cellulaires) = -1,0 MPa
- ψ du xylème du tronc = -0,8 MPa
- ψ du xylème des racines = -0,6 MPa
- ψ du sol = -0,3 MPa



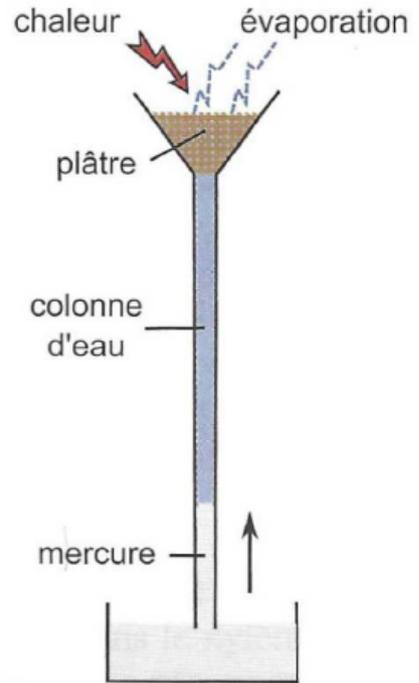
DOC 16 – EXPERIENCES HISTORIQUES DE MISE EN EVIDENCE DES MOTEURS DE LA CIRCULATION DE LA SEVE BRUTE (Segarra, Peycru)

EXPERIENCE HISTORIQUE DE HALES (1727)

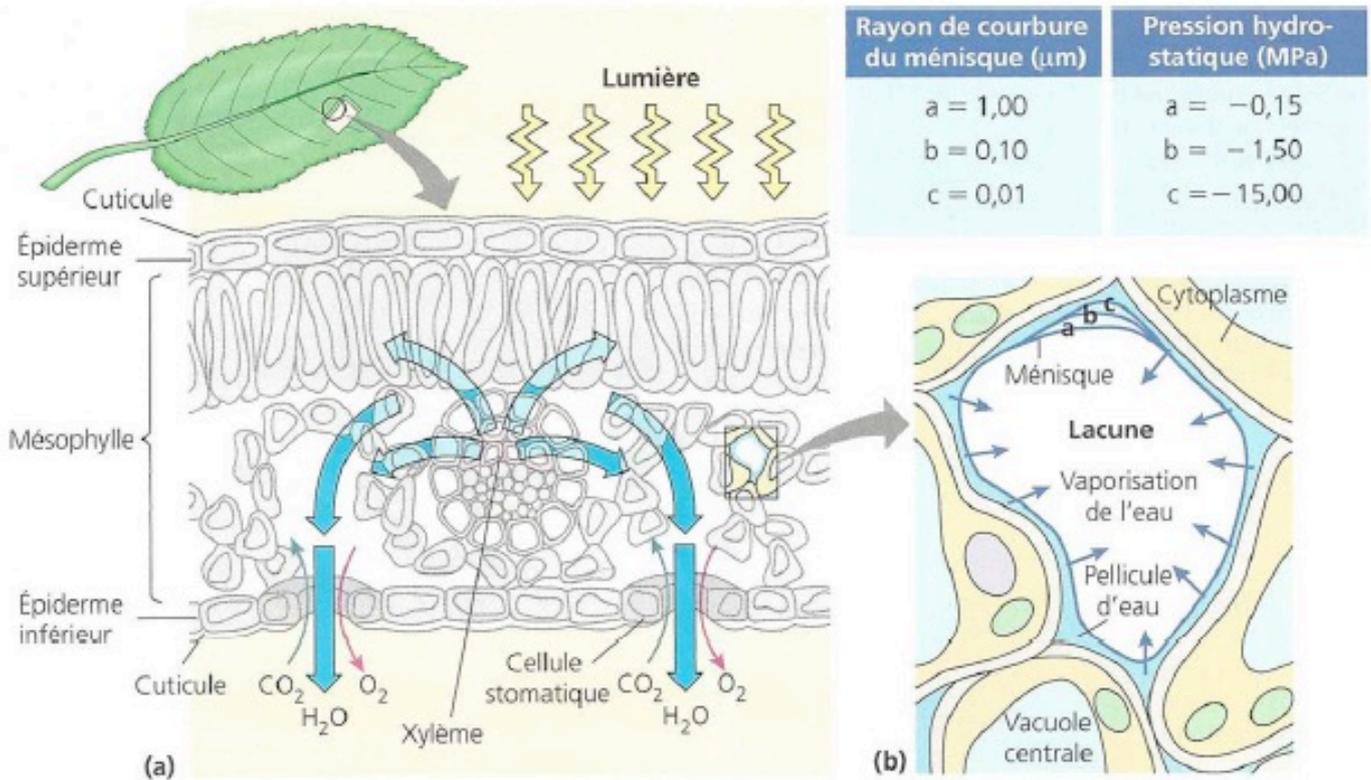


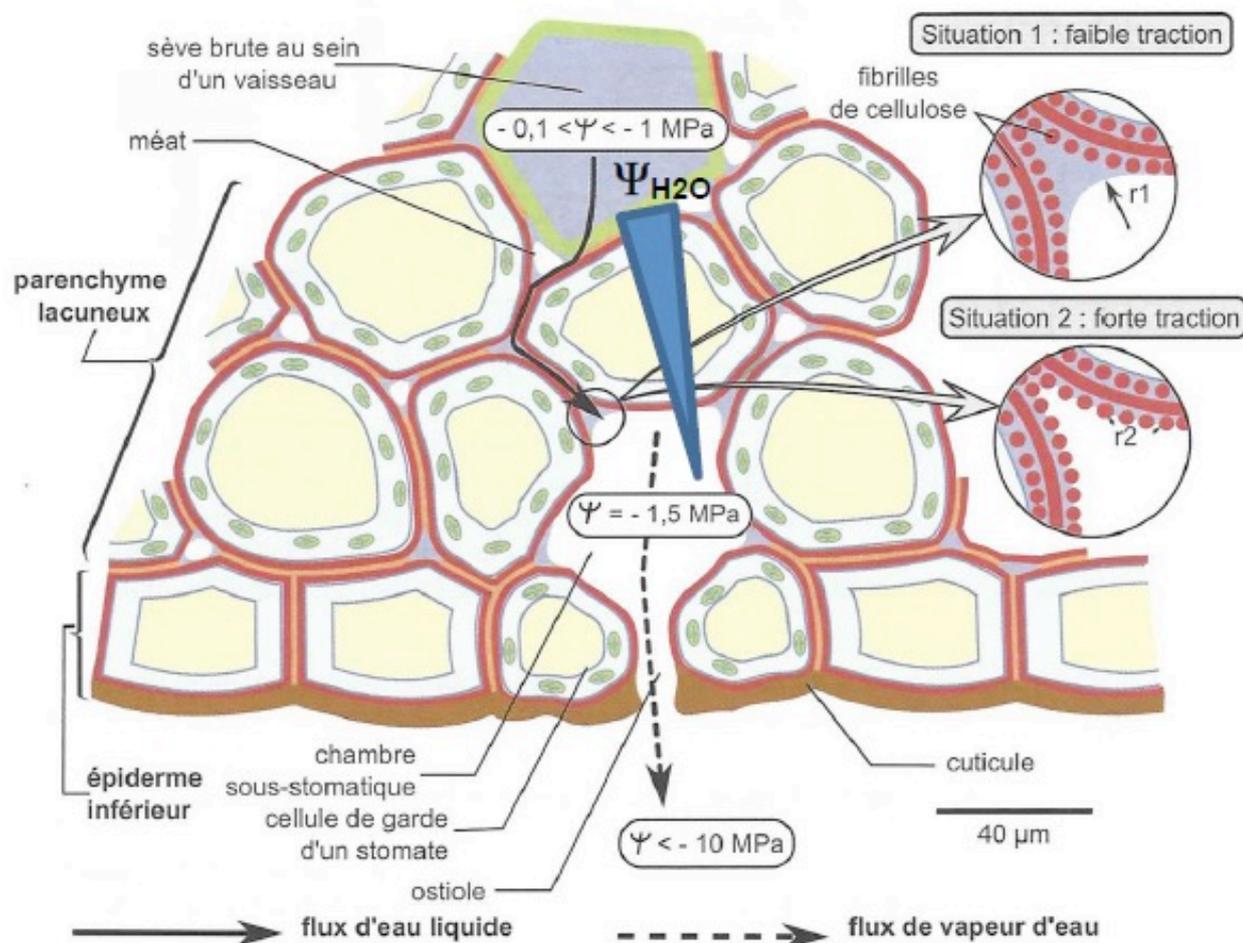
Un pied de vigne a été coupé à sa base et relié à un dispositif permettant d'évaluer la pression exercée par l'eau sortant de l'appareil racinaire. A l'état initial, l'ampoule ne contient que du mercure. On mesure au cours du temps la montée du mercure dans le tube ouvert et donc soumis à la seule pression atmosphérique.

EXPERIENCE HISTORIQUE DE DIXON (1914)



DOC 17 – MECANISME DE L'ASPIRATION FOLIAIRE (Campbell, Peycru)





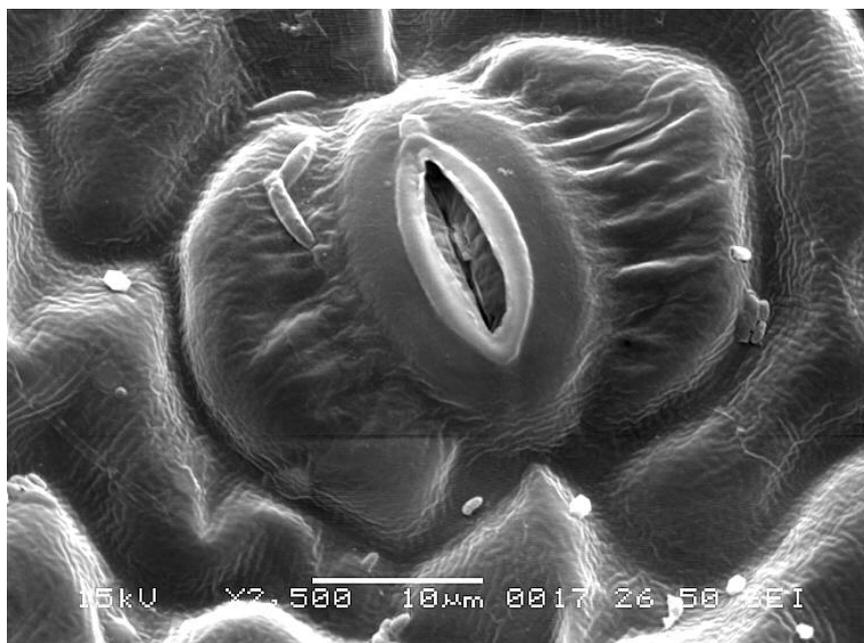
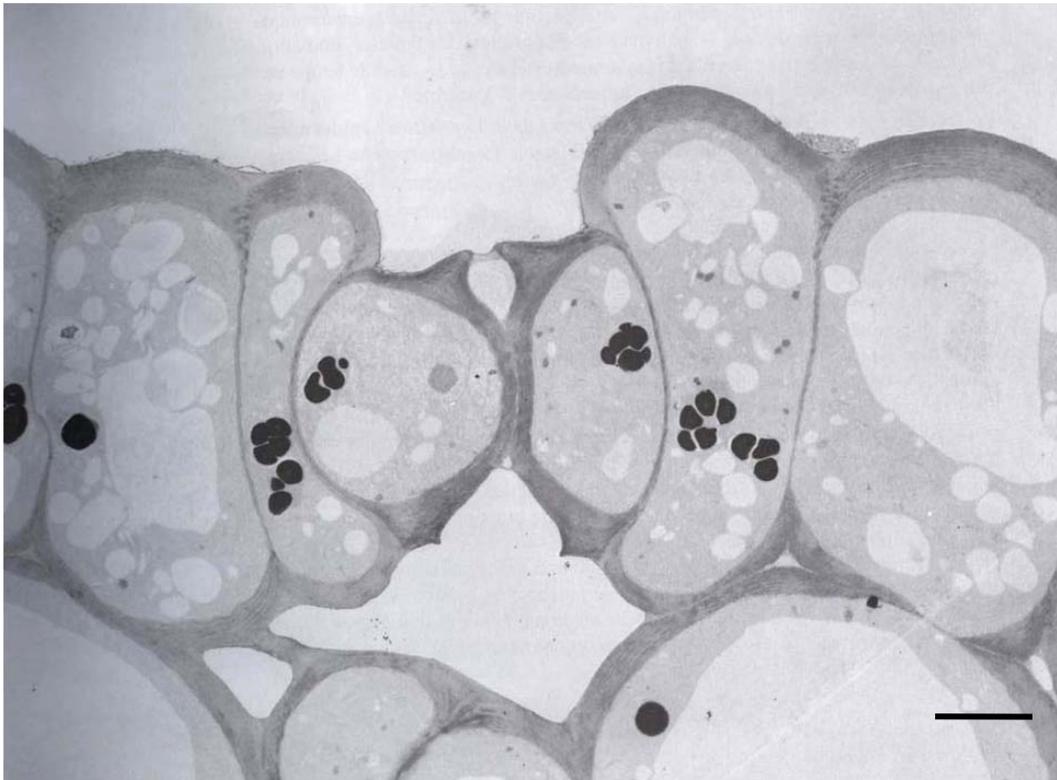
DOC 18 – UTILISATION DES SELS MINÉRAUX PAR LES PLANTES (Campbell)

Éléments	Forme(s) disponible(s) pour les plantes	Fonction(s) principale(s)
Éléments majeurs		
Carbone	CO_2	Constituant essentiel des molécules organiques des Végétaux.
Oxygène	CO_2	Constituant essentiel des molécules organiques des Végétaux.
Hydrogène	H_2O	Constituant essentiel des molécules organiques des Végétaux.
Azote	NO_3^- , NH_4^+	Constituant des acides nucléiques, des protéines, des hormones et des coenzymes.
Soufre	SO_4^{2-}	Constituant des protéines et des coenzymes.
Phosphore	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	Constituant des acides nucléiques, des phosphoglycérolipides, de l'ATP et de plusieurs coenzymes.
Potassium	K^+	Cofacteur nécessaire à la synthèse des protéines; soluté essentiel à l'équilibre hydrique; ouverture et fermeture des stomates.
Calcium	Ca^{2+}	Élément important pour la formation et la stabilité de la paroi cellulaire; maintien de la structure et de la perméabilité des membranes; activation de certaines enzymes; régulation de nombreuses réponses cellulaires aux stimulus.
Magnésium	Mg^{2+}	Constituant de la chlorophylle; activation de nombreuses enzymes.
Éléments mineurs		
Chlore	Cl^-	Élément nécessaire à l'étape de la photolyse de l'eau dans la photosynthèse; rôle dans l'équilibre hydrique.
Fer	Fe^{3+} , Fe^{2+}	Constituant des cytochromes; activation de certaines enzymes.
Bore	H_2BO_3^-	Cofacteur dans la synthèse de la chlorophylle; peut jouer un rôle dans le transport des glucides et dans la synthèse des acides nucléiques.
Manganèse	Mn^{2+}	Participation à la synthèse des acides aminés; activation de certaines enzymes; nécessaire à l'étape de la photolyse de l'eau dans la photosynthèse.
Zinc	Zn^{2+}	Participation à la synthèse de la chlorophylle; activation de certaines enzymes.
Cuivre	Cu^+ , Cu^{2+}	Constituant de nombreuses enzymes d'oxydoréduction et d'enzymes assurant la synthèse de la lignine.
Molybdène	MoO_4^{2-}	Élément essentiel à la fixation de l'azote; cofacteur nécessaire à la réduction des nitrates.
Nickel	Ni^{2+}	Cofacteur d'une enzyme participant au métabolisme de l'azote.

ECHANGES GAZEUX AVEC LE MILIEU DE VIE

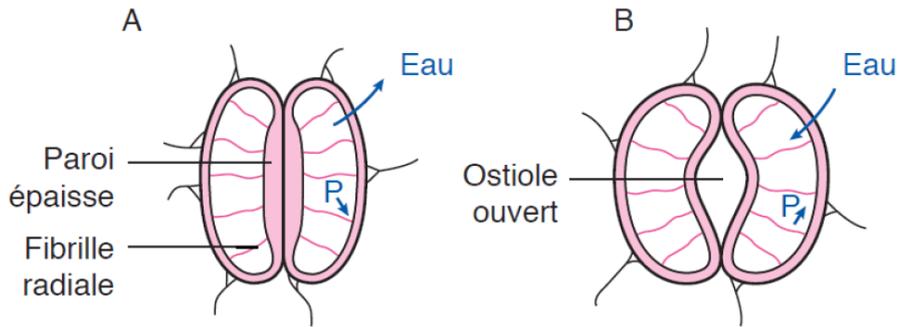
DOC 19 – TISSU EPIDERMIQUE FOLIAIRE OBSERVE AU MET (HAUT) ET AU MEB (BAS)

Un traitement particulier a été effectué, qui rend l'amidon opaque aux électrons. Barre d'échelle : 10 μm .



DOC 20 – ORGANISATION STRUCTURALE DE LA PAROI DES CELLULES DE GARDE ET MECANISME D’OUVERTURE / FERMETURE DES STOMATES (Segarra)

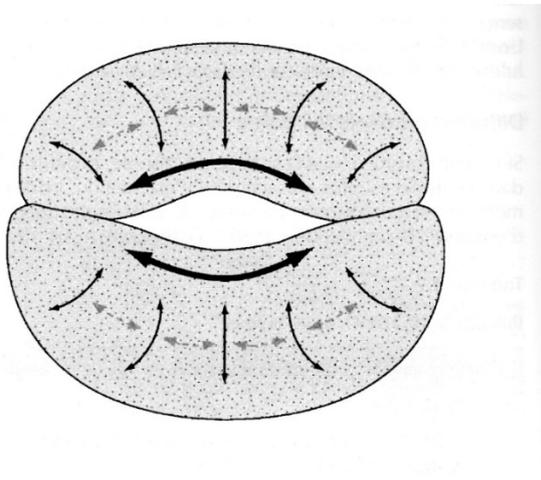
Les microfibrilles de cellulose de la paroi des cellules de garde ont une orientation majoritairement radiale, ce qui conditionne l’orientation de la déformation des cellules.



A. Cellules de garde peu turgescents et ostiole fermé.

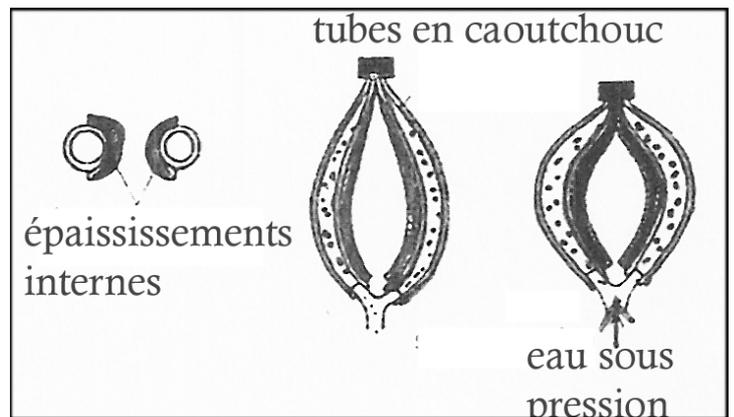
B. Cellules de garde très turgescents et ostiole ouvert.

P: pression exercée par l’eau sur les parois cellulaires. Les stomates sont entourés de cellules épidermiques banales.



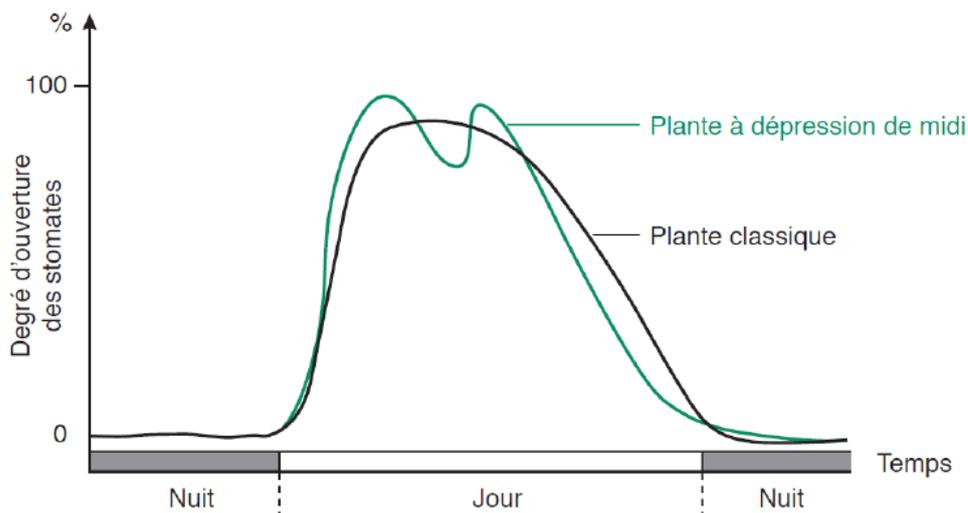
Rôle des microfibrilles dans le mouvement des cellules de garde. L’orientation des microfibrilles (flèches continues) dans les cellules de garde elliptiques ne permet l’expansion des cellules que dans la direction indiquée par les flèches en pointillés. Cela provoque la déformation des cellules et par conséquent un accroissement de l’ouverture située entre les parois adjacentes.

Modèle analogique de fonctionnement d’un stomate

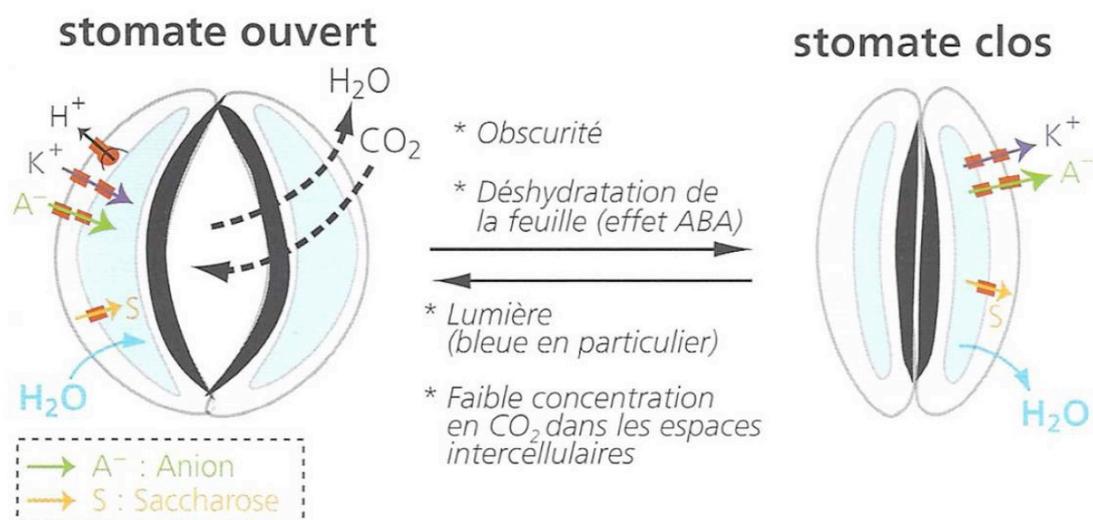


DOC 21 – MISE EN EVIDENCE DE FACTEURS DU MILIEU CONTROLANT L’OUVERTURE DES STOMATES (Segarra)

Suivi de l’ouverture des stomates lors d’une journée chaude et ensoleillée.



Le degré d’ouverture est mesuré en pourcentage de l’ouverture maximale. Lors d’une journée ensoleillée et sèche, la dépression de midi existe chez davantage d’espèces. Dans des conditions particulièrement sèches, les stomates ne sont ouverts qu’en début de matinée.

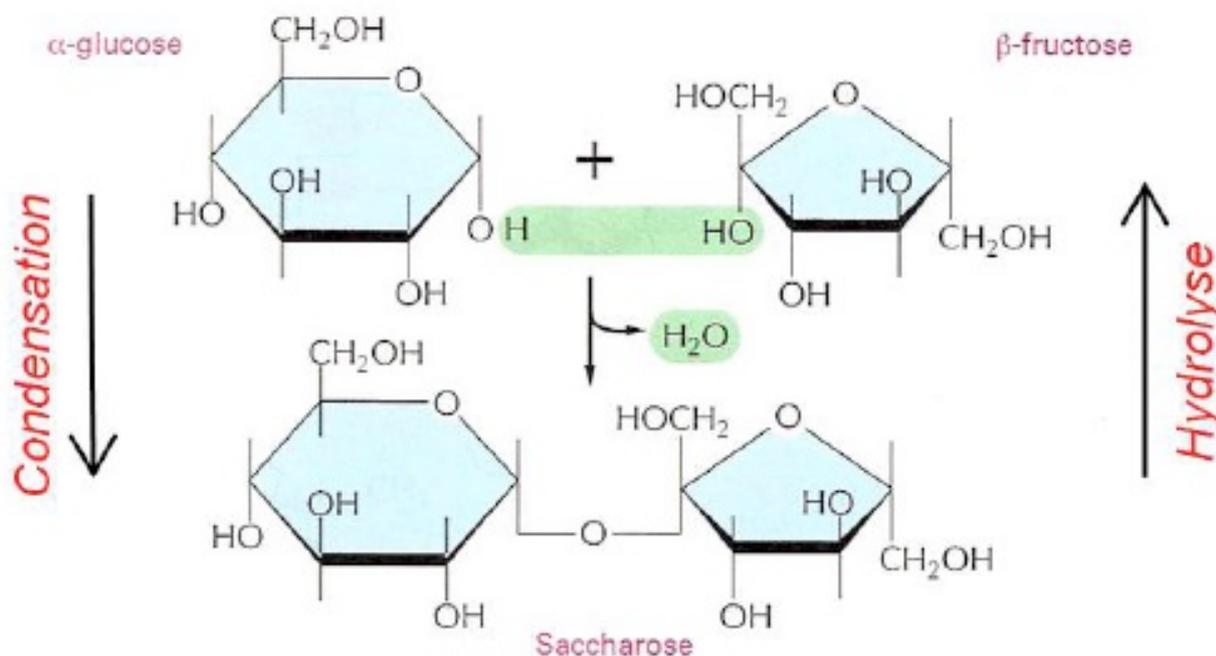
DOC 22 – VUE D'ENSEMBLE DES MECANISMES D'OUVERTURE ET FERMETURE DES STOMATES (Meyer)**facteurs d'ouverture et de fermeture des stomates**

L'ouverture est permise par la lumière reçue par la chlorophylle (radiations bleues et rouges) et les récepteurs de lumière bleue qui activent une H^+ -ATPase de la membrane plasmique. L'extrusion de protons abaisse le potentiel électrique membranaire entraînant l'ouverture de canaux K^+ voltage dépendants et l'entrée des ions Cl^- dans le cytosol. L'influx de K^+ cytosolique dans la vacuole est compensé électriquement par l'influx d'anions cytosoliques par des canaux qui s'ouvrent lors de l'ouverture des stomates (Cl^- venant initialement de l'apoplasme, malate $^{2-}$ du cytosol). Du saccharose s'accumule aussi dans les vacuoles. Cette accumulation d'ions et de métabolites abaisse le potentiel hydrique de la cellule de garde par rapport aux cellules épidermiques, d'où un influx d'eau, une augmentation de la turgescence de la cellule de garde entraînant l'ouverture du stomate.

La fermeture est induite par les ions calcium qui entraînent, par une cascade de signalisation, l'arrêt des pompes à H^+ , la dépolarisation de la cellule et, au final, l'efflux d'anions, de K^+ , de saccharose et d'eau (cf. encadré).

DISTRIBUTION DES ASSIMILATS PHOTOSYNTHETIQUES AU SEIN DU VEGETAL

DOC 23 – LE SACCHAROSE (Alberts)



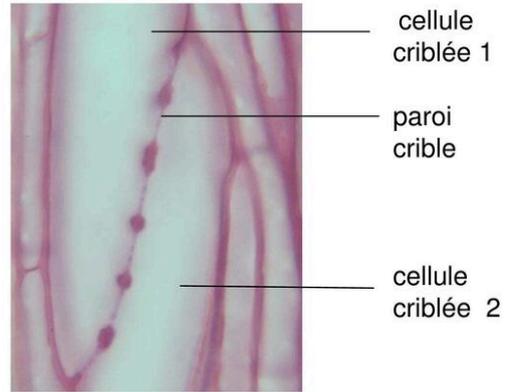
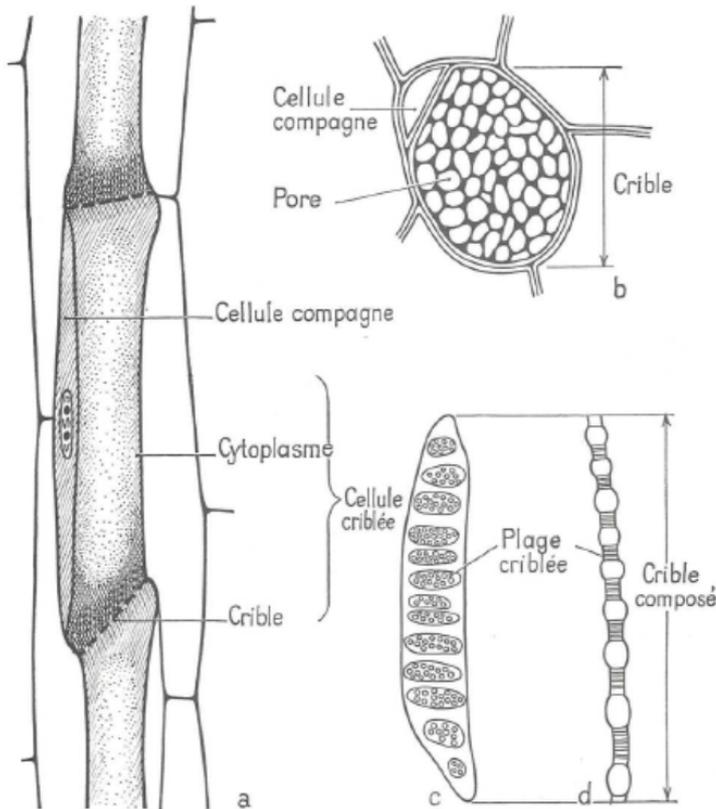
DOC 24 – ETUDE DE LA COMPOSITION DE LA SEVE ELABOREE GRACE AUX INSECTES SUCEURS DE SEVE

<https://www.zoom-nature.fr/la-seve-elaboree-des-sources-aux-puits/>

Le puceron est un insecte qui se nourrit en piquant le végétal. Il enfonce son stylet (pièce buccale spécialisée) dans la plante et absorbe un liquide appelé sève élaborée. En coupant le stylet, la sève élaborée s'écoule en petite quantité et peut être analysée.



DOC 25 – RELATION STRUCTURE / FONCTION DES TUBES CRIBLES DU PHLOEME (Camefort / Segarra)

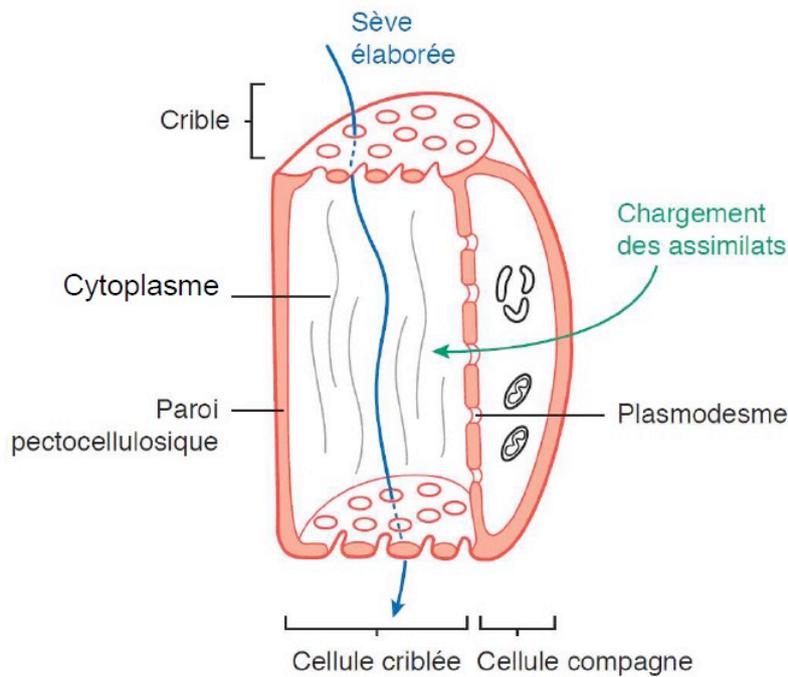


Tubes criblés observés sur une coupe longitudinale de tige (coloration carmino-vert). La coloration rose de la paroi met en évidence une **paroi cellulosique**. Les cribles placent les **cytoplasmes des 2 cellules en continuité**. Le diamètre d'un tube criblé est d'environ 15-20 μm .

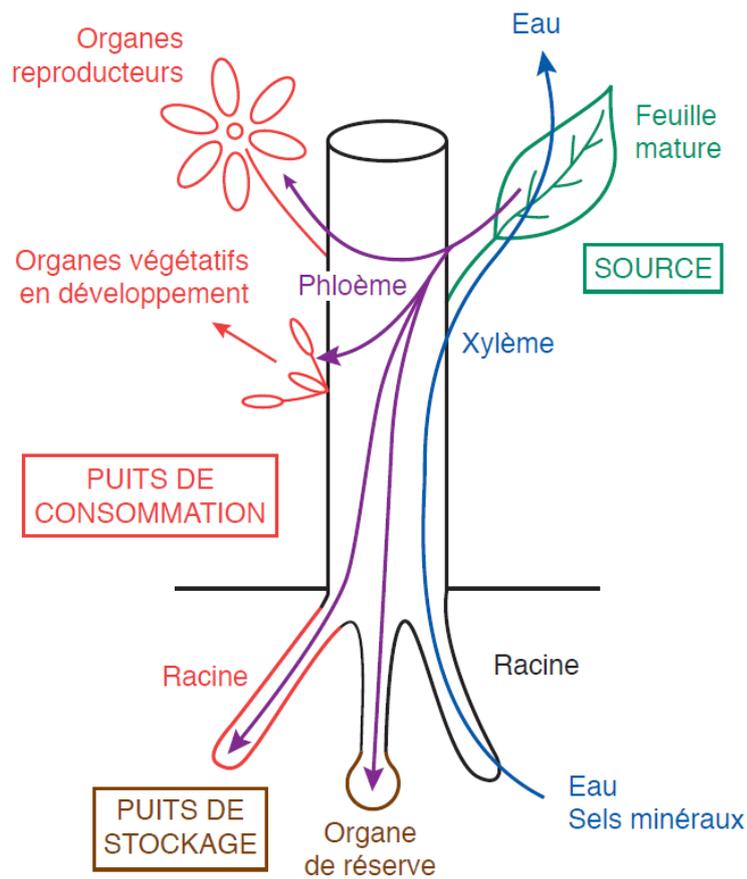
Cellules et tubes criblés.

a : portion de tube criblé vue en coupe longitudinale; b : crible simple vu de face (Courge); c : crible composé vu de face; d : vu en coupe (Vigne).

Le complexe phloémien : un tube criblé associé à une cellule compagne



DOC 27 – CORRELATIONS TROPHIQUES ENTRE ORGANES CHEZ LES ANGIOSPERMES (ETE) (Segarra)



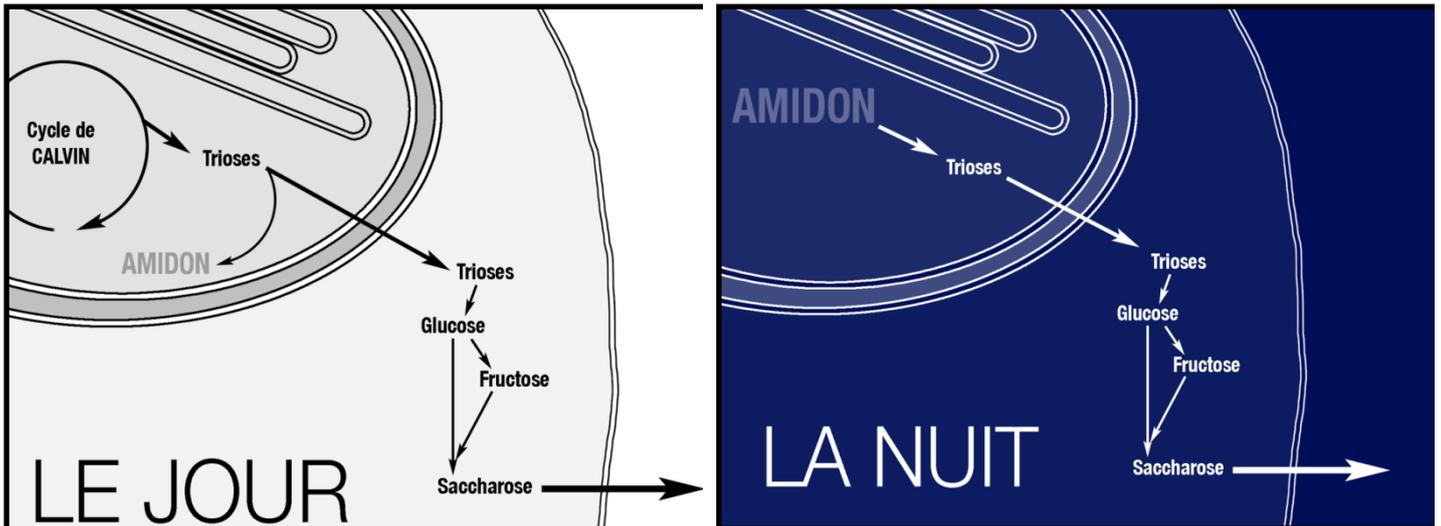
Le cas présenté est celui d'une angiosperme pendant une journée d'été. Flèche bleue : sève brute; flèche violette : sève élaborée.

DOC 28 – STOCKAGE DES PHOTOASSIMILATS DANS LES FEUILLES SELON UNE PERIODICITE JOUR / NUIT

CLICHE DE MET DE CHLOROPLASTE MONTRANT LE STOCKAGE D'AMIDON



MECANISME DE STOCKAGE / DESTOCKAGE DE L'AMIDON SELON UNE PERIODICITE JOUR / NUIT

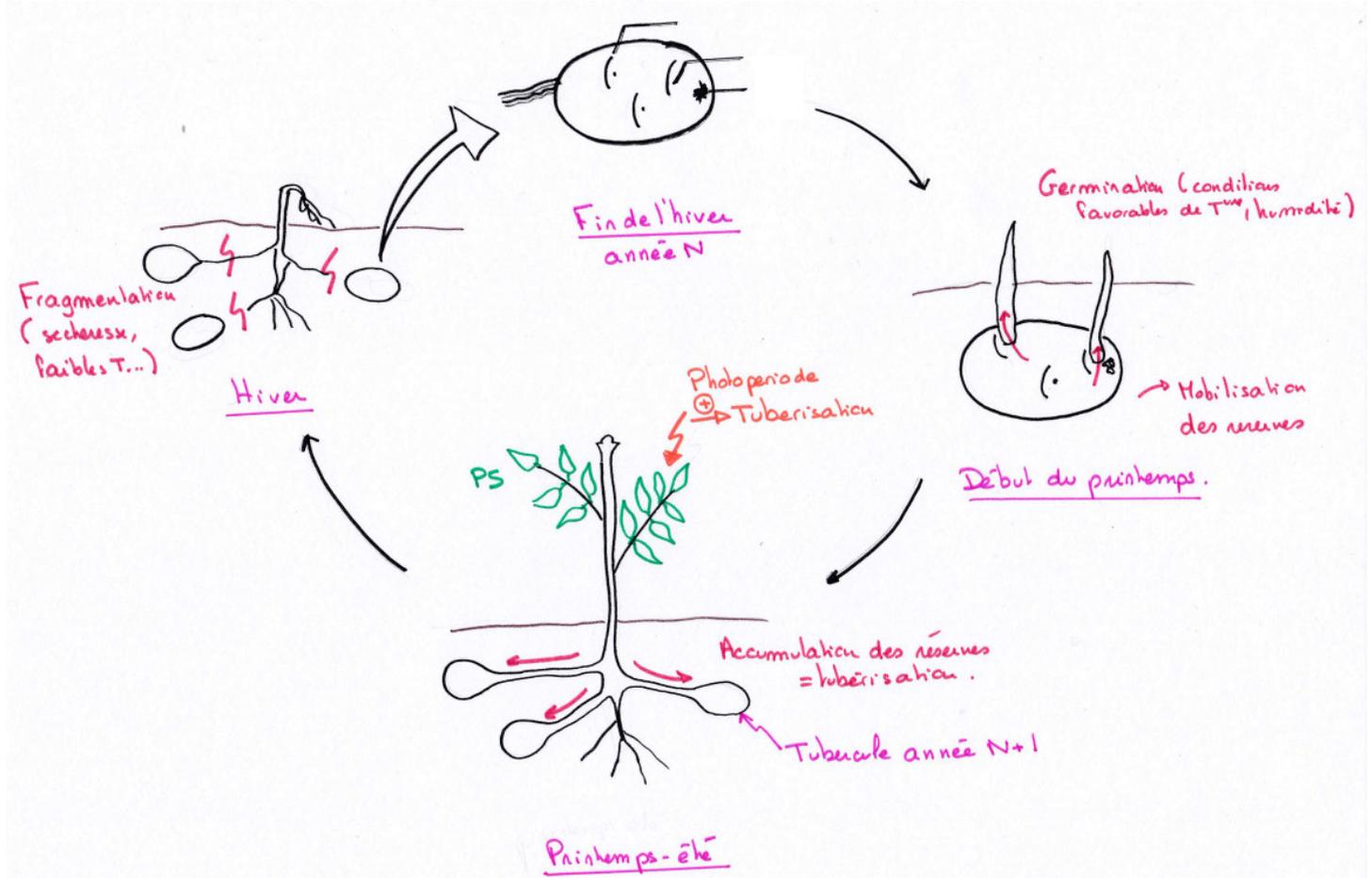


DOC 29 – CYCLE DE REPRODUCTION DE LA POMME DE TERRE PAR MULTIPLICATION VEGETATIVE

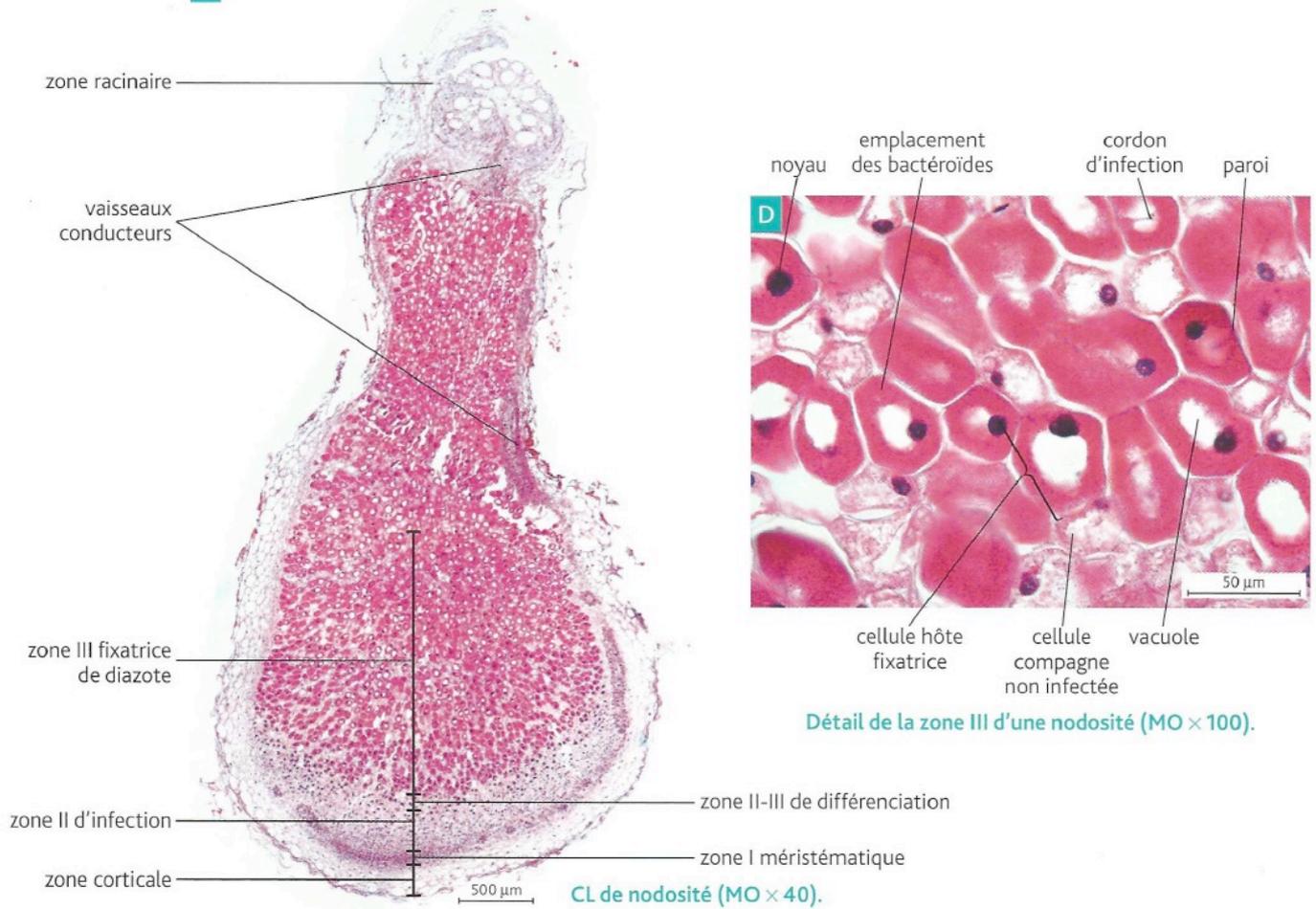
Lors de la phase de tubérisation (de fin juin à octobre, déclenchée par la photopériode), les photoassimilats sont distribués dans les tubercules et le saccharose y est stocké sous forme d'amidon dans les amyloplastés. Les tubercules sont alors des **puits de stockage**.

Phase de vie ralentie pendant l'hiver.

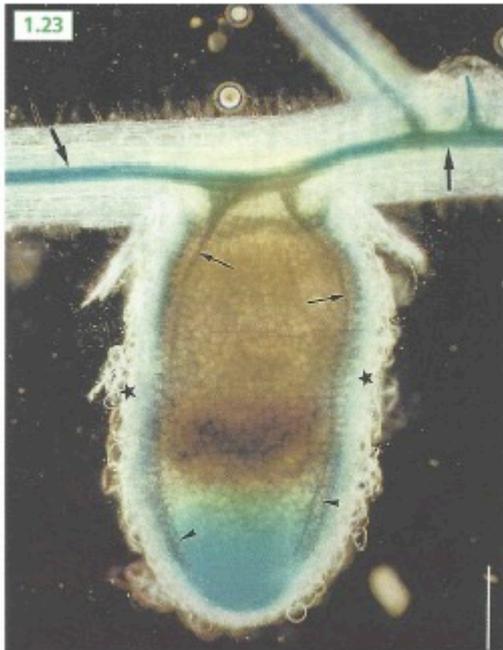
Au printemps, les tubercules isolés produisent de nouveaux plants (= multiplication végétative) ; les réserves du tubercule sont alors mobilisées, les tubercules deviennent des **organes sources**. L'amidon est hydrolysé par des amylases, le glucose (ou maltose) issu de cette hydrolyse est retransformé en saccharose et chargé dans le xylème, puis acheminé vers les jeunes bourgeons en développement.



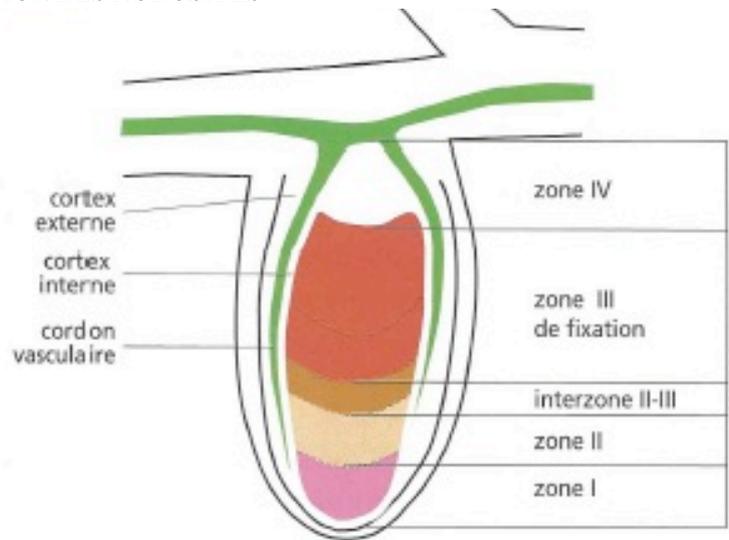
DOC 30 – OBSERVATION DE NODOSITES AU MICROSCOPE OPTIQUE (Boutin, Duhoux & Nicole)



ZONATION DES NODOSITES



Nodule de Luzerne de 3 semaines. Les larges flèches montrent la vascularisation de la plante, l'astérisque montre le cortex du nodule. Echelle : 0,5 µm.



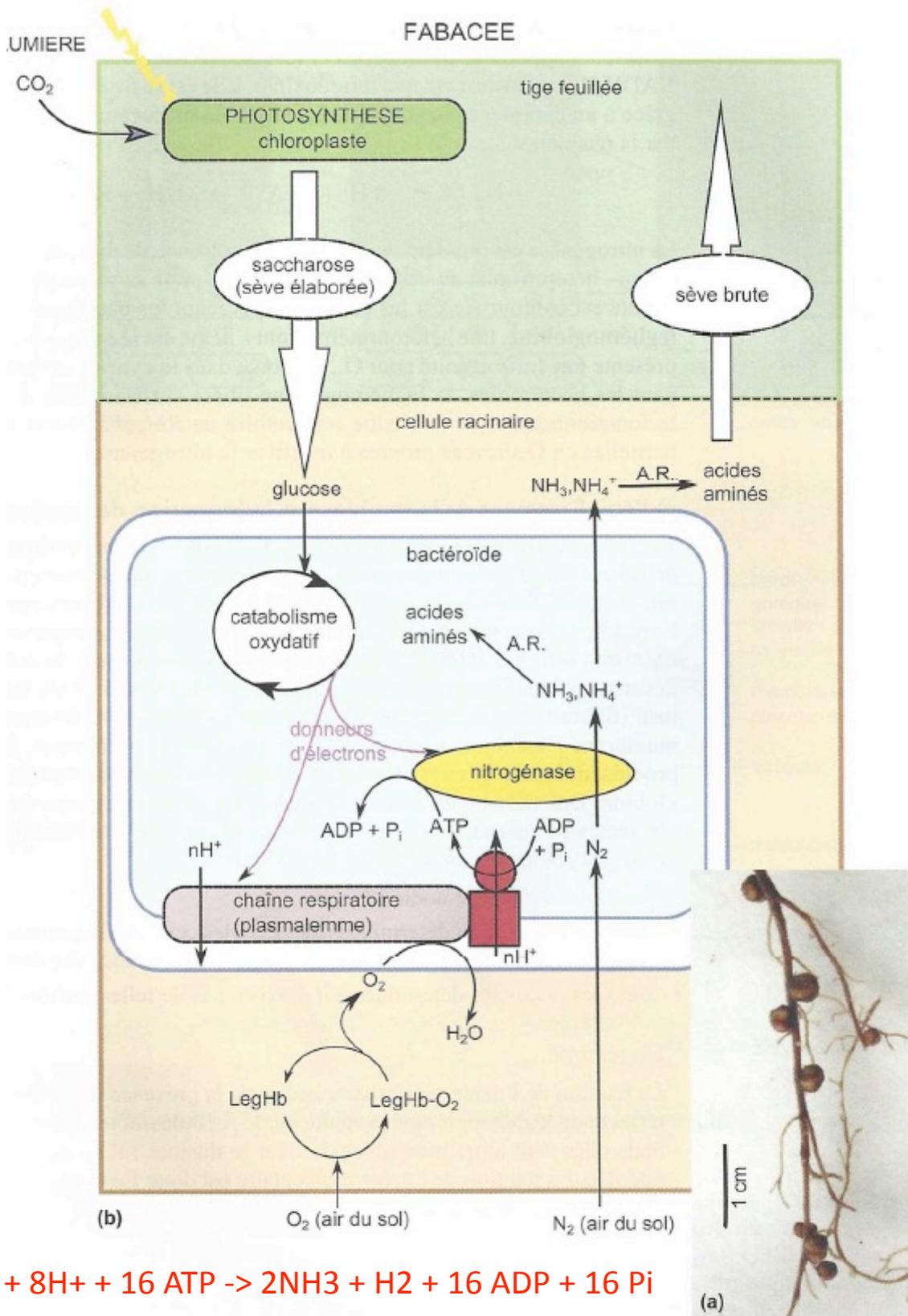
Zone I = zone méristématique : les cellules, généralement sans bactéroïdes, se divisent => multiplication des cellules et croissance du nodule

Zone II = zone d'infection : les cellules sont infectées par les bactéries déversées par le **cordons d'infection** (

Zone III = zone fixatrice : les bactéries se transforment en bactéroïdes par **endocytose**, les bactéroïdes sont dans une vésicule délimitée par la membrane péribactéroïdienne. Zone où a lieu la **fixation de N₂**

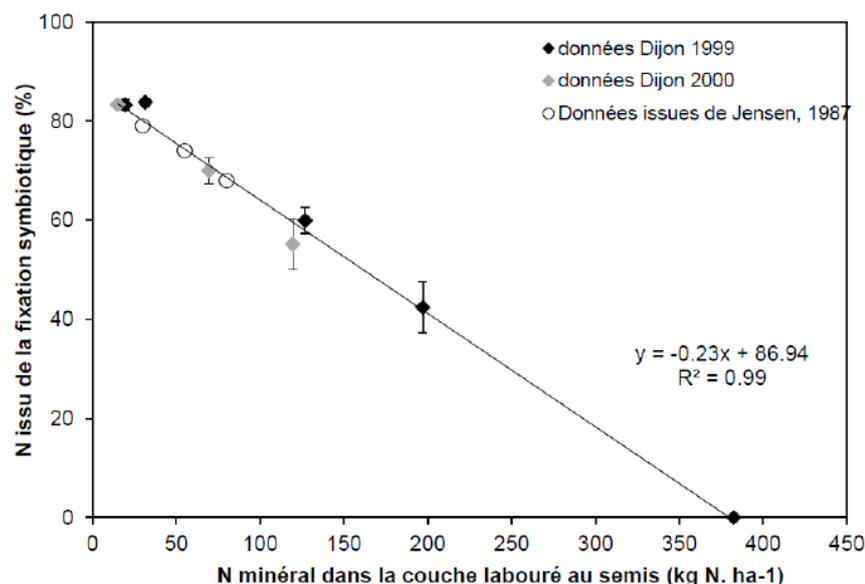
Zone IV = zone de sénescence : les bactéroïdes sont lysés et dégèrent.

DOC 31 – FONCTIONNEMENT GLOBAL D'UNE NODOSITE (*Peycru*)



La symbiose Fabacée-Rhizobium.

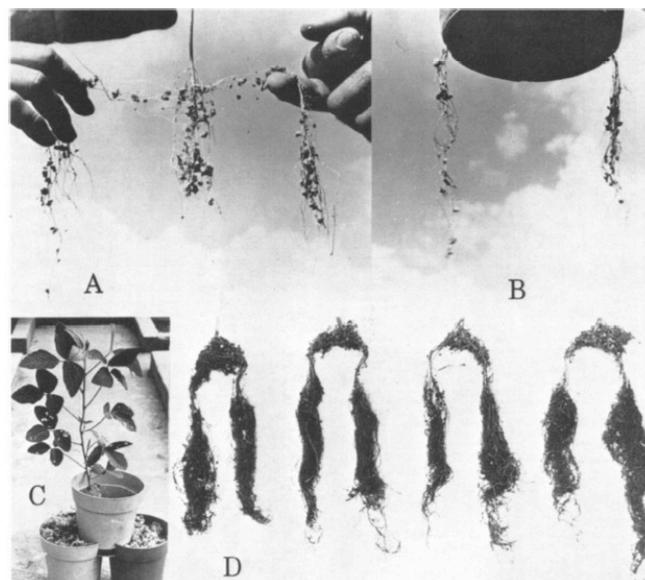
(a) Nodosités racinaires de fabacée (b) échanges entre partenaires. A.R. : amination réductrice.

DOC 32 – APPROCHES EXPERIMENTALES : ETUDE DE L'IMPACT DE LA FERTILITE DU SOL SUR LA FORMATION DE NODOSITES**ETUDE EN CHAMP (Voisin 2004)**

Contribution de la fixation symbiotique à l'acquisition totale d'azote par le peuplement sur la totalité du cycle de la plante, en fonction de la disponibilité en azote minéral (nitrates + ammonium) dans la couche labourée mesurée au semis (Expérimentation au champ INRA Dijon). Modifié d'après Voisin et al., 2002b.

DISPOSITIF DE SPLIT-ROOT ET RESULTATS EXPERIMENTAUX (thèse A Cazenave 2014 ; Ohyama 2011)

Figure 0.5 Dispositif du split-root, décrit et utilisé par Hinson (1975). A. Développement des racines chez des plantes de 17 jours, lorsque le pivot a été coupé 7 jours auparavant. Des particules de Vermiculite adhèrent aux racines. Aucune nodosité n'est formée à ce stade. B. Racines latérales sortant de 2 extrémités opposées de 15cm d'un pot. C. Dispositif du split-root chez des plantes de 44 jours. D. Système racinaire amendé avec 0, 30, 60 et 120 ppm d'azote de gauche à droite. Les racines traitées avec de l'azote se trouve sur la moitié droite de chaque système racinaire.



A: nodule number per a plant, B: Nitrogen fixation activity per unit mass (g dry weight) of nodules, C: Nodule mass per a plant.

