

# SV-B-2 NUTRITION DES ANGIOSPERMES EN LIEN AVEC LE MILIEU

SV-B INTERACTIONS ENTRE LES ORGANISMES ET LEUR MILIEU DE VIE



**Savoirs visés**

La plante prélève la solution du sol par une absorption racinaire sélective d'eau et d'ions minéraux mettant en action des échanges transmembranaires. Cette absorption s'effectue soit directement à partir de la solution du sol par des poils absorbants soit, le plus souvent, grâce au fonctionnement de mycorhizes.

Les mycètes impliqués dans ces associations symbiotiques augmentent la surface d'absorption mais assurent aussi une protection physico-chimique contre les pathogènes. L'absorption de l'eau suit les différences de potentiel hydrique dans la racine. Il existe des voies de circulation symplasmique et apoplasmique.

L'absorption d'eau et d'ions est à l'origine de la sève brute qui circule dans le xylème.

La transpiration foliaire et la poussée racinaire constituent deux moteurs complémentaires d'ascension de la sève brute.

Les stomates permettent un flux d'eau par transpiration, qui met en mouvement la sève brute dans le xylème, ainsi que les échanges de  $\text{CO}_2$  et  $\text{O}_2$  entre l'atmosphère externe et l'atmosphère interne du végétal.

L'ouverture des stomates est contrôlée par différents facteurs du milieu : elle joue à la fois sur l'équilibre hydrique du végétal et sur son métabolisme.

Les photosynthétats produits dans les organes sources sont distribués dans les organes puits via la sève élaborée. Les organes de réserve sont des organes puits/sources qui accumulent la matière organique. Les réserves sont accumulées/mobilisées avec une périodicité variable, quotidienne et/ou saisonnière.

Au sein des nodosités développées dans l'appareil racinaire de Fabacée, des bactéries symbiotiques utilisant les assimilats de la plante sont capables d'utiliser le diazote et de le réduire en ammonium. Les cellules racinaires contenant les bactéroïdes produisent des molécules organiques azotées exportées dans le xylème. La formation de nodosités dépend de la fertilité du sol.

**Capacités exigibles**

- Réaliser ou exploiter des préparations microscopiques de limbe de feuille pour :

- identifier les espaces de circulation des gaz (stomates, chambres sous-stomatiques et méats/lacunes) ;

- relier la localisation et la répartition des stomates avec l'orientation de la feuille.

- Expliquer le lien entre l'ouverture des stomates et la montée de la sève brute.

Réaliser ou exploiter des préparations microscopiques de limbe de feuille (colorées au carmino-vert) pour :

- identifier le phloème dans des coupes transversales et/ou longitudinales de racine, de tige et de limbe de feuille ;

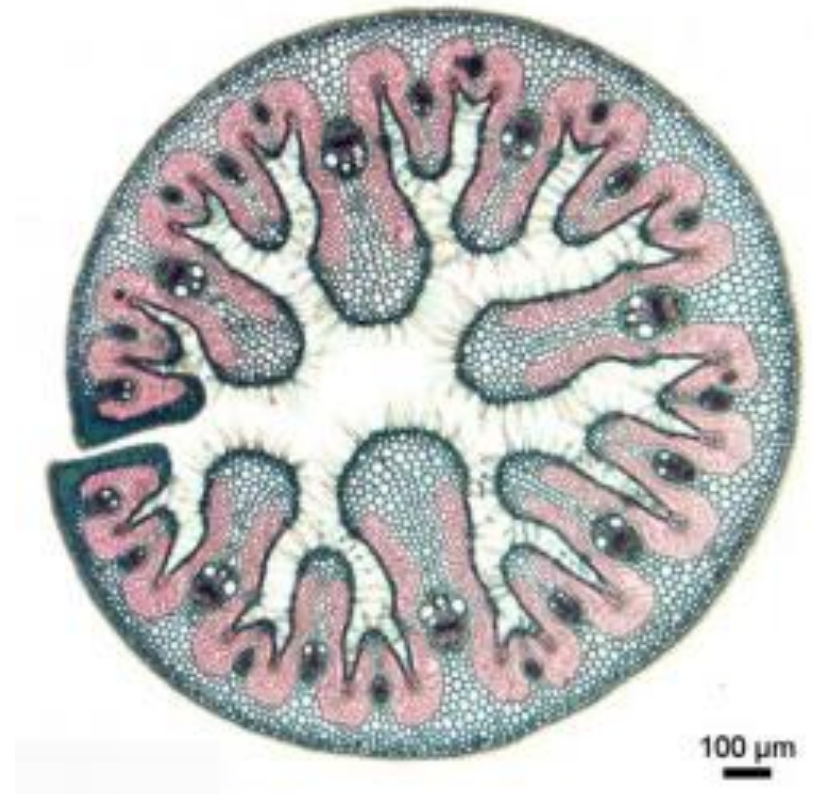
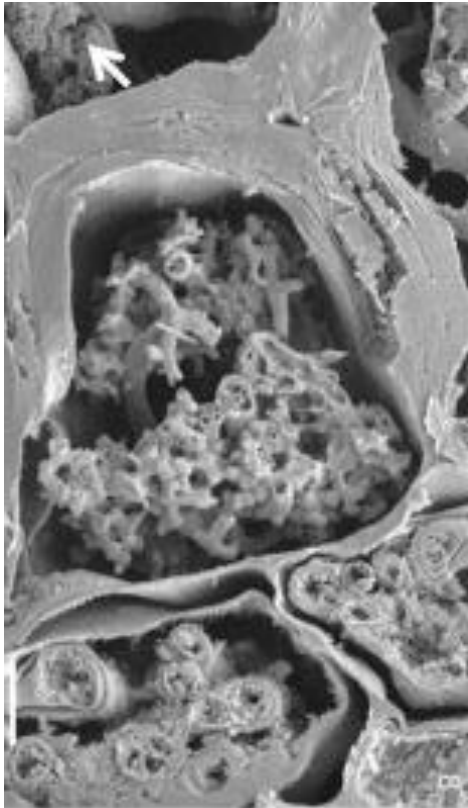
- identifier les structures de réserve d'un organe végétatif au choix à l'échelle de l'organe, de la cellule, des molécules ;

- mettre en évidence des réserves amylacées ;

- En prenant appui sur des coupes de nodosité, présenter l'organisation fonctionnelle de celle-ci.

- Exploiter des données expérimentales afin d'identifier des mécanismes de contrôle de développement de nodosités suivant les teneurs en nitrates et ammonium dans le sol.

# INTRODUCTION



Quelques structures impliquées dans la nutrition des Angiospermes.

De gauche à droite : cliché au MEB **d'arbuscules mycorrhiziens** dans une cellule végétale ; cliché au MET d'un filament mycélien au contact d'une paroi végétale au sein d'une ectomycorhize (H: haustorium, CW: paroi cellulaire) ; cliché au MO d'une coupe transversale de feuille d'oyat, plante des milieux secs

# INTRODUCTION

- Végétaux: êtres vivants **fixés** vivant à **l'interface sol/atmosphère**.
- ⇒ puisent la **matière** et **l'énergie** nécessaires à leur fonctionnement à la fois **dans le sol** et **dans l'atmosphère**
- ⇒ organismes **aériens**, qui présentent des **adaptations** à **ce milieu desséchant** et **peu porteur**
- Végétaux: êtres vivants **autotrophes** : ils produisent leur propre matière organique à partir de matière minérale, via la photosynthèse

***Comment la structure de l'organisme végétal lui permet-elle de puiser des ressources dans les compartiments avec lesquels il interagit ?***

***Comment sont réalisés les échanges entre le végétal et ces compartiments, et entre les différentes parties de la plante ?***

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# I. L'ABSORPTION DE LA SOLUTION HYDROMINERALE DU SOL EST REALISEE PAR LES RACINES

## A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS



### I. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions

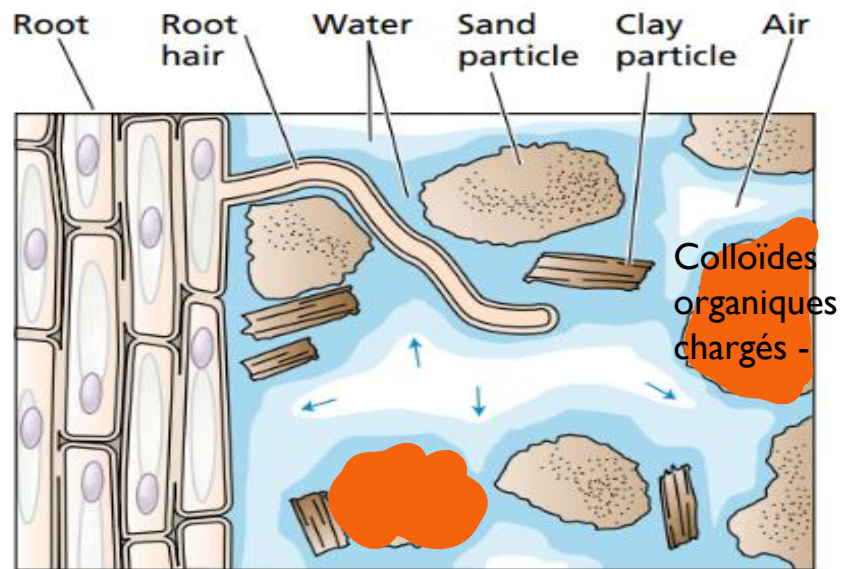


Figure 1 : interactions entre les racines et le sol (roche mère, air, matière organique)

- Sol: structure complexe issue des **interactions** entre la **roche mère**, l'**atmosphère** et les **êtres vivants**
- **Sol: phase solide (roche mère + CAH) + phase liquide (solution du sol) + phase gazeuse**

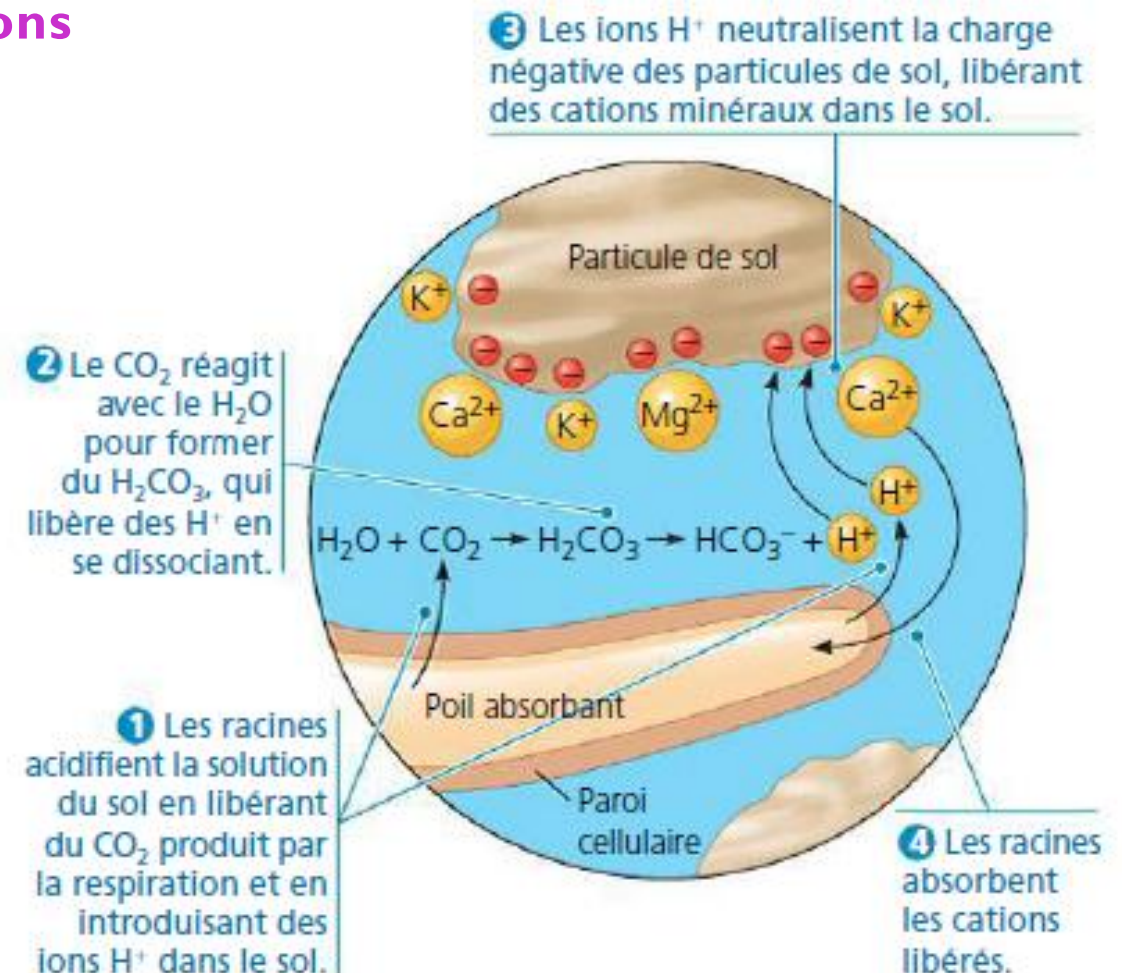


Figure 2 : l'échange de cations dans le sol

# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## I. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions

- Sol = ressources en **eau** et en **ions minéraux dilués**
  - concentration varie selon le type de sol, la période de l'année, etc.
  - Teneur en eau et en ions minéraux **disponibles** pour la plante = facteurs déterminants pour sa croissance.
- **complexe argilo-humique = association de particules minérales et organiques chargée négativement**, enrobées de glomaline (secrétée par champignon et stabilisatrice). NB d'après MAS artefact de laboratoire
  - ⇒ CAH attire cations, eux-mêmes associés à des anions.

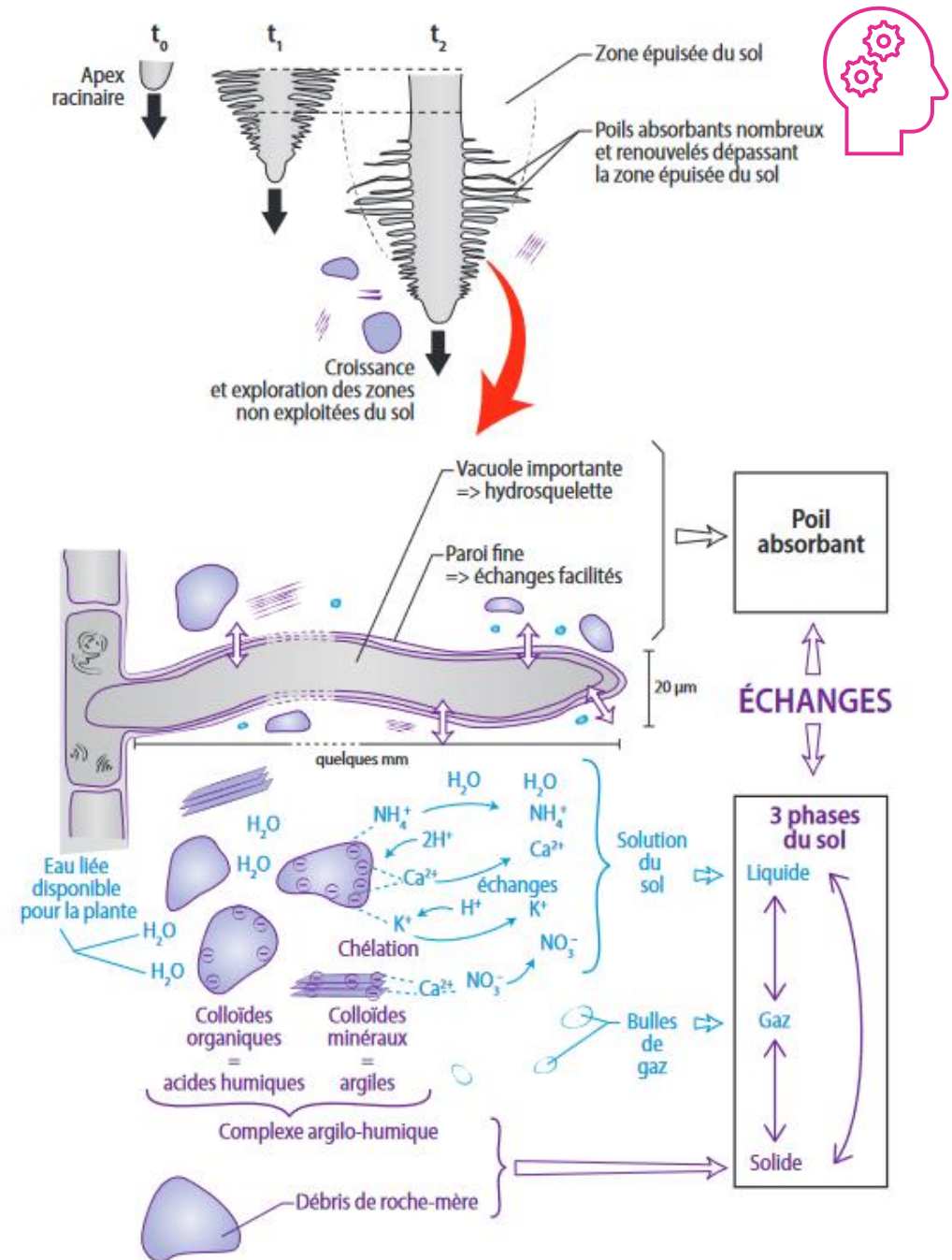


Figure 3 : l'interaction entre les phases du sol et les poils absorbants (Vuibert, ed 2021)

# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## I. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions

- CAH attire cations, eux-mêmes associés à des anions
- Principaux ions absorbés par racines:
  - ions nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) → source d'azote pour la plante
    - ✓ issus de la décomposition de la matière organique
    - ✓ facilement lessivés
  - ions phosphates,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  → source de phosphore
  - $\text{K}^+$
  - Bilan: cf engrais NPK, les proportions de chacun des éléments variant selon l'utilisation.

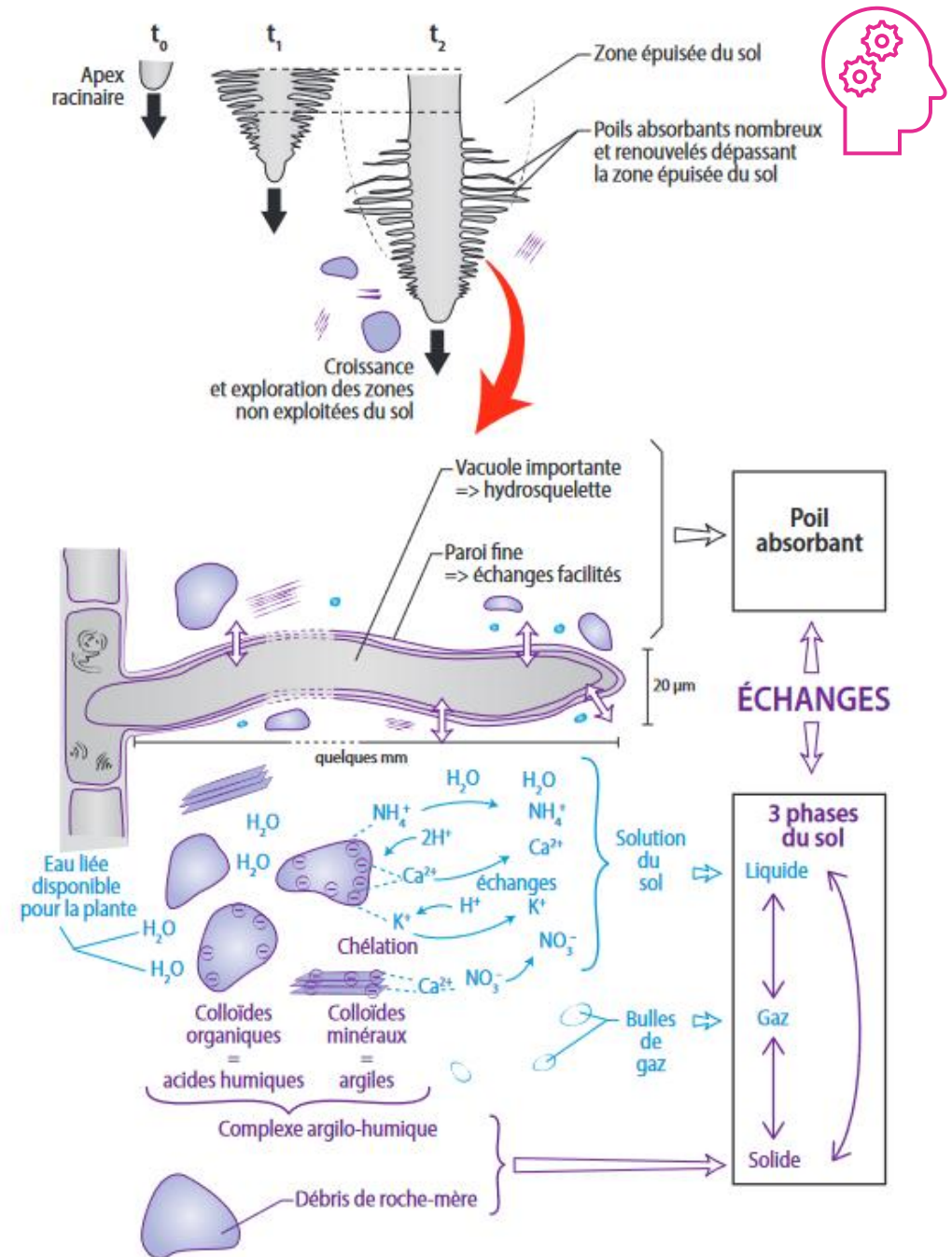
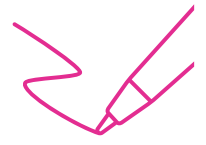
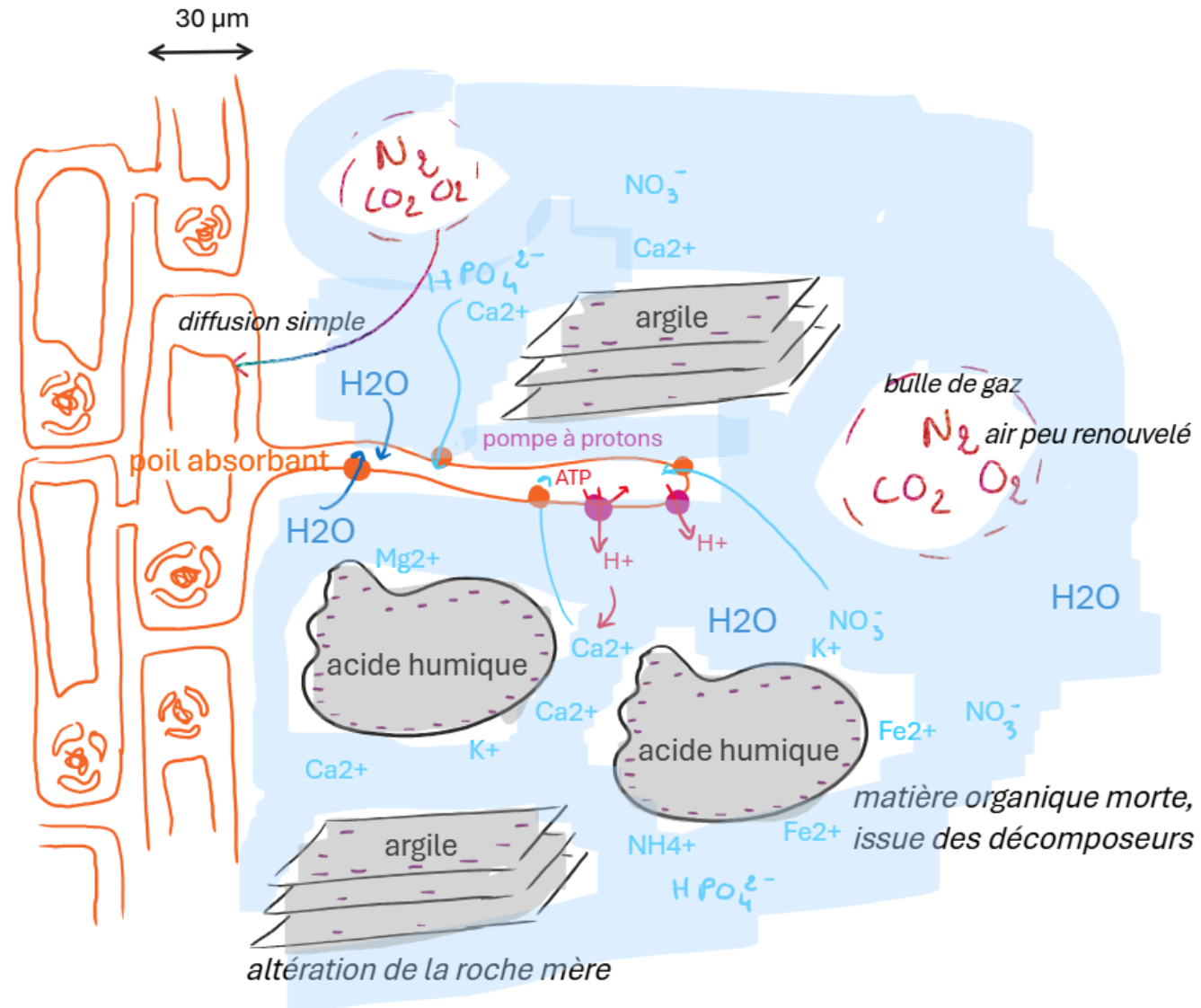


Figure 3 : l'interaction entre les phases du sol et les poils absorbants (Vuibert, ed 2021)



## Les constituants du sol

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol

- faible concentration des ions et quantité variable d'eau dans le sol ⇒ grande surface racinaire au contact de la solution du sol.
- zone pilifère = portion subterminale de la racine pourvue de nombreux poils absorbants
  - Mise en évidence: expérience de Rosen
  - cellules allongées du tissu épidermique = rhizoderme.
  - cellules nombreuses ( $200/\text{cm}^2$ ) avec de nombreuses aquaporines

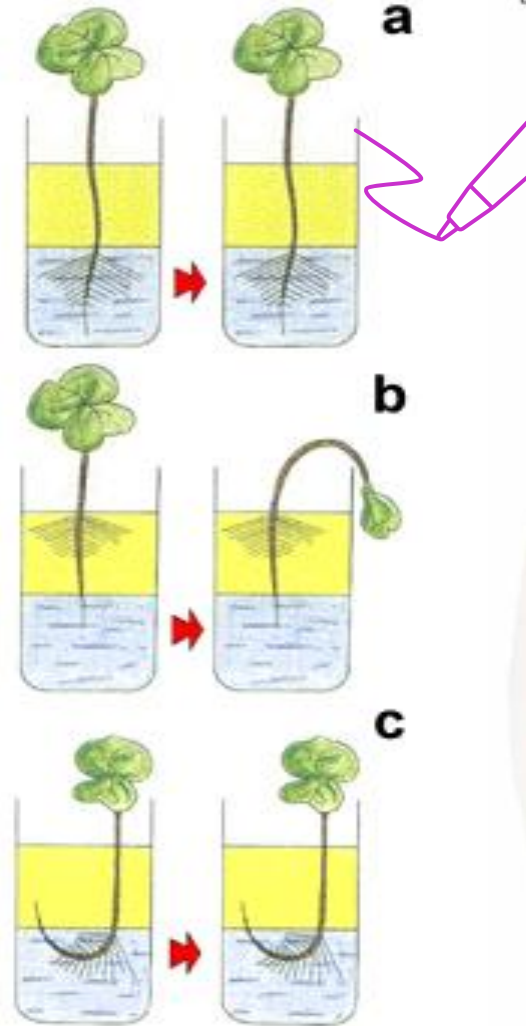


Figure 5 : expériences de Rosen

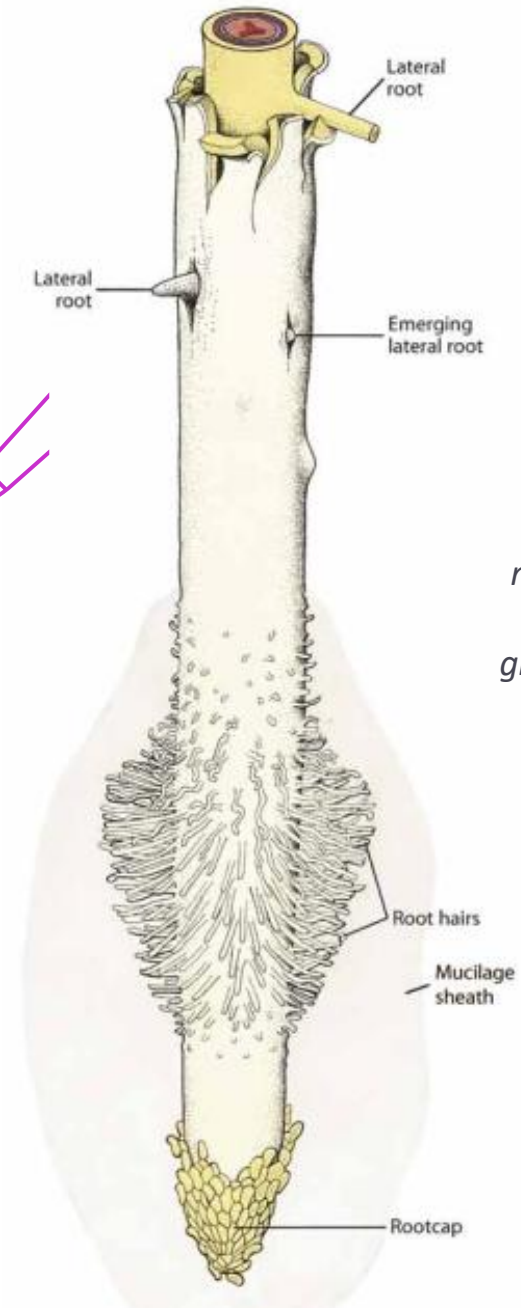


Figure 4 : schéma de l'organisation de l'apex racinaire



Figure 24-9a  
Figure of Plants, Seventh Edition  
© W. H. Freeman and Company

*mise en évidence de la zone pilifère sur une graine de radis germée*

# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol

- **Zone pilifère** = portion subterminale de la racine pourvue de nombreux **poils absorbants**
  - Cellules à **paroi très fine (loi de Fick)** + membrane riche en **aquaporines** et transporteurs d'ions
  - croissance de la racine ⇒ exploration du milieu
  - **relation** entre **structure de l'organe** (nombreux poils absorbants, grande surface, faible épaisseur, structure progressant dans l'espace au cours du temps) et **fonction** (absorption des ressources du milieu et adaptation à l'appauvrissement progressif de celui-ci).

Cf SV-C3 p.74

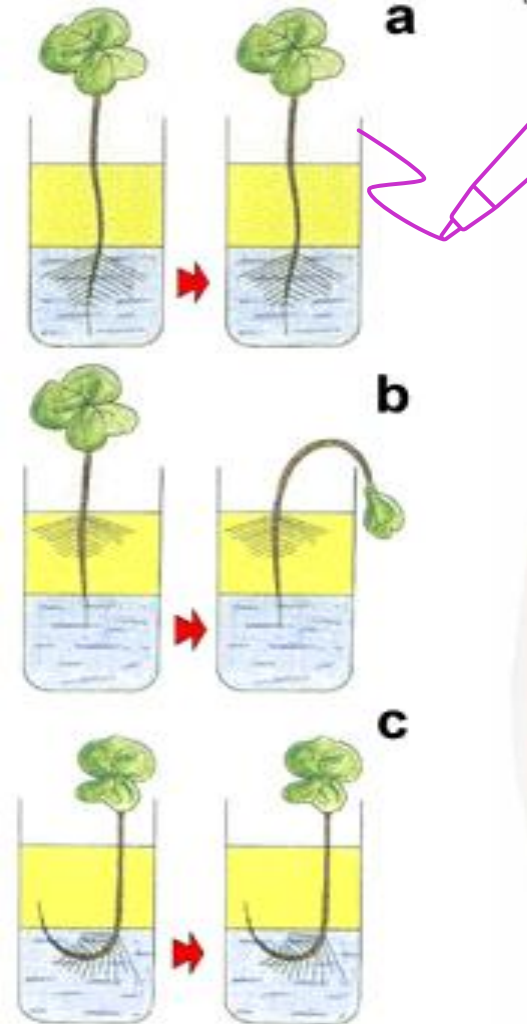


Figure 5 : expériences de Rosen

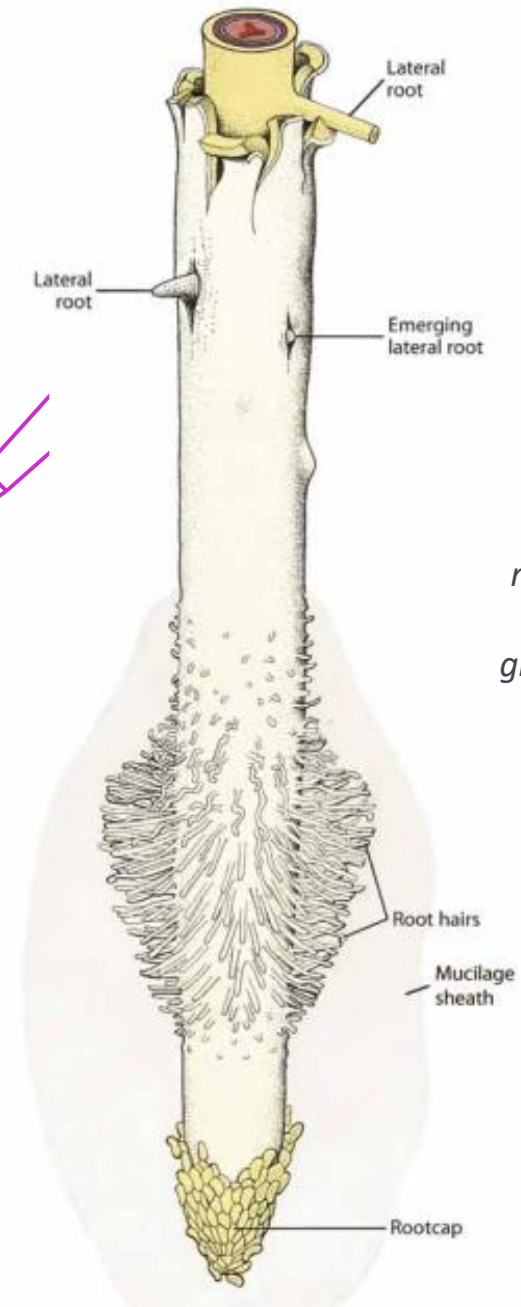


Figure 4 : schéma de l'organisation de l'apex racinaire



Figure 24-9a  
Figure of Plants, Seventh Edition  
© W. H. Freeman and Company

*mise en évidence de la zone pilifère sur une graine de radis germée*

# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol

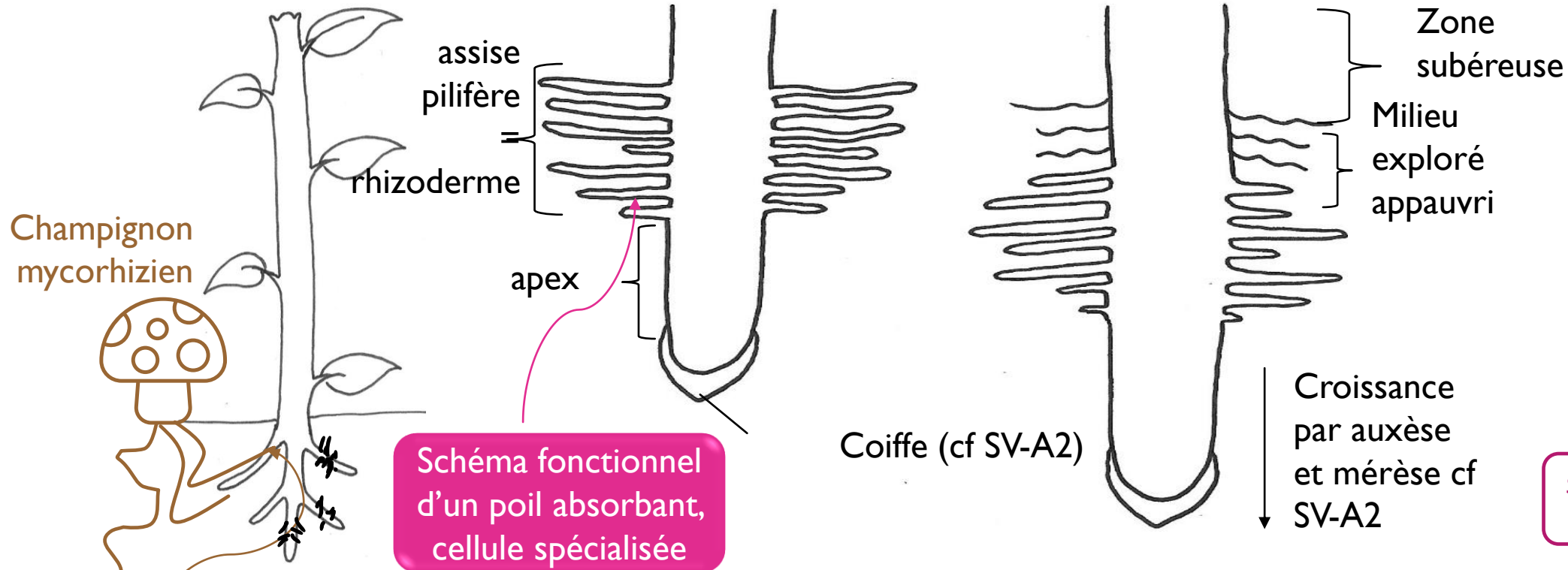


Figure 6 : schéma de l'apex racinaire, et exploration du milieu

- Si plante jeune: poils absorbants (60% de surface racinaire)
- Si plante > qqs mois: symbiose avec champignon = mycorhize (95% des Angiospermes)
- ⇒ Protection contre:
  - ✓ sécheresse
  - ✓ Agents pathogènes
  - ✓ Brouteurs (sécrétion alcaloïdes)

Seules les brassicacées n'ont pas de symbiose mycorhizienne



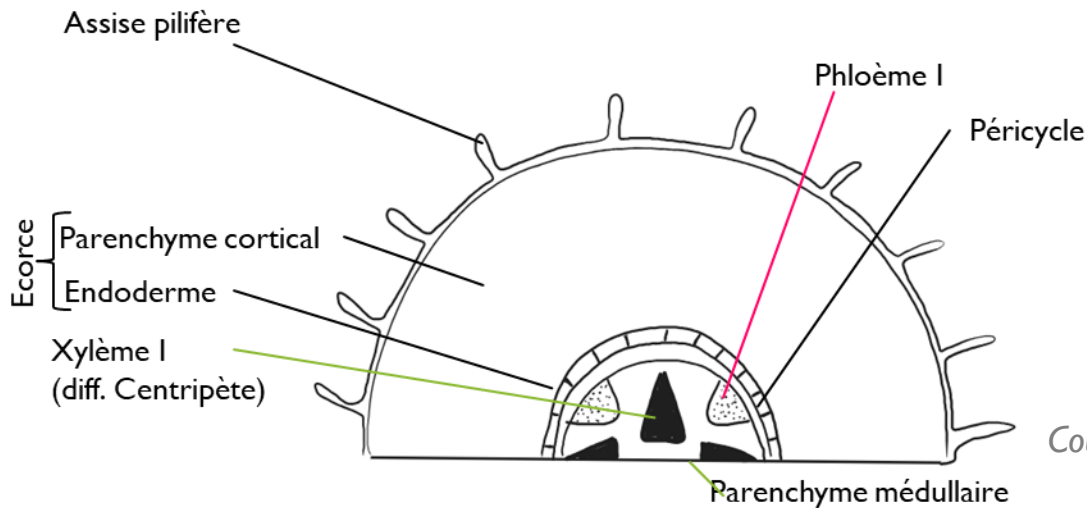
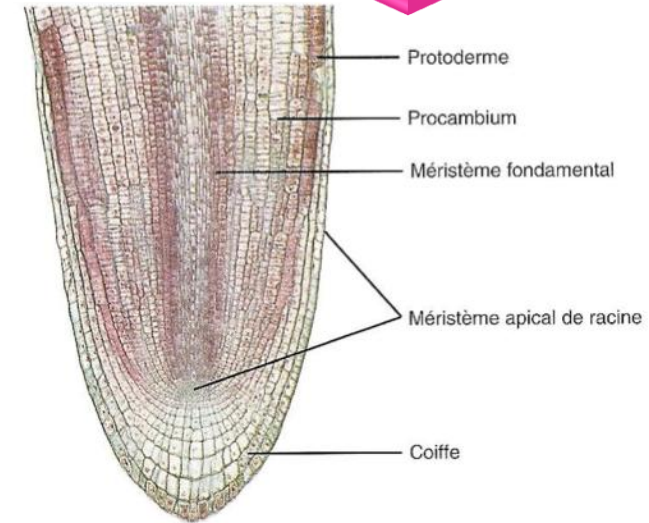
- **Zone apicale:** croissance par mèresè et auxèse
- **Assise pilifère:** zone d'absorption avec rapide appauvrissement du sol
- Zone subapicale = **zone subéreuse = subérifiée = ancrage et conduction** des sèves
- croissance subterminale + gravitropisme positif des racines  
→ prospection du sol dans des zones non encore épuisées

Schéma fonctionnel d'une CT racinaire avec ecto et endomycorhize

### 3. Modalités de croissance chez les végétaux : mères, auxès et construction d'unités répétitives, les phytomères

#### 3.1. Les méristèmes primaires : centre histogène et organogène

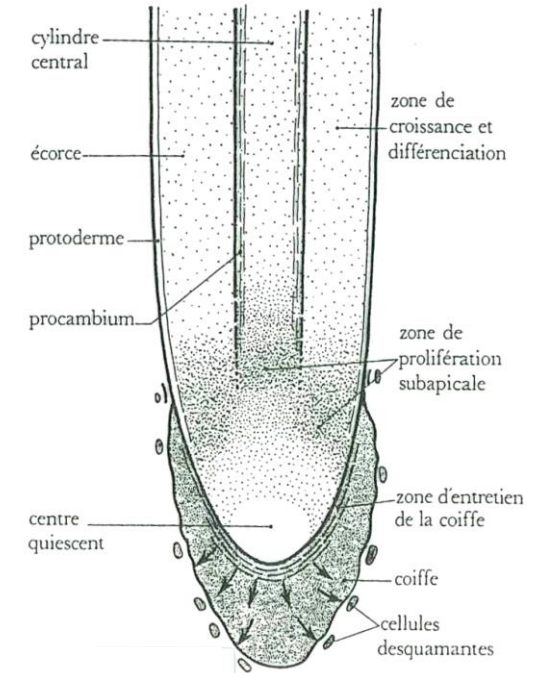
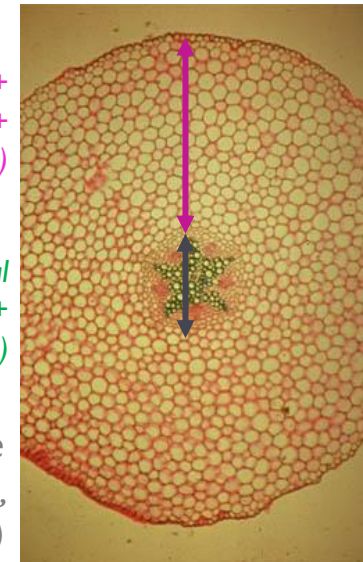
- **L'assise pilifère**: distance constante à l'apex racinaire, poils absorbants
- **L'écorce** : très épaisse (comparativement à celle de la tige),
  - **parenchyme non chlorophyllien** → accumulation de **réserves**
  - **endoderme** (imprégnation de lignine et subérine en U chez les Monocotylédones et en cadre de Caspary chez les Dicotylédones)
- Le **cylindre central** :
  - **péricycle** + rayons médullaires = moelle
  - **vaisseaux de xylème**
  - **tubes du phloème**
- La **coiffe** recouvre l'apex racinaire ; elle produit des **exsudats polysaccharidiques** qui facilitent la progression racinaire dans le sol et contient des **statolithes** impliqués dans le **gravitropisme**.

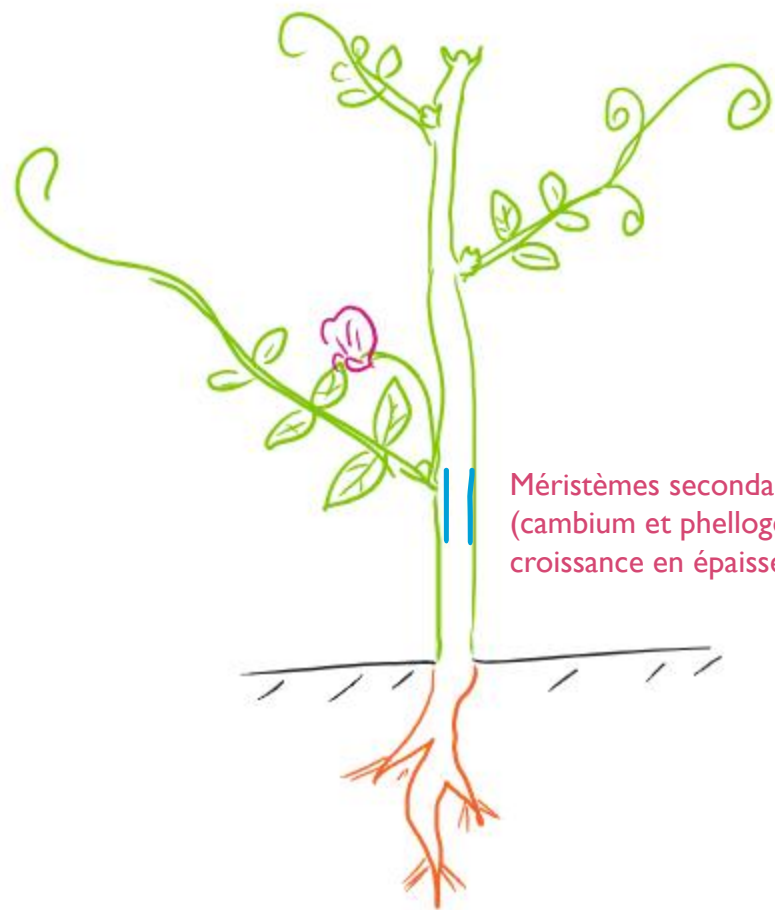


*Écorce (assise pilifère + parenchyme + endoderme)*

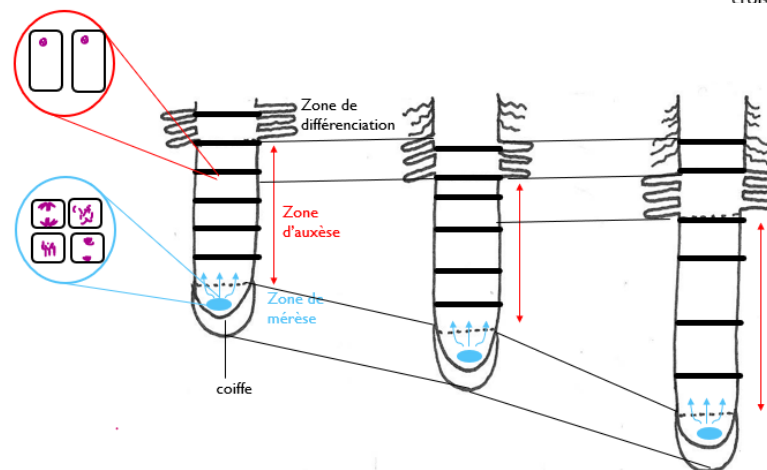
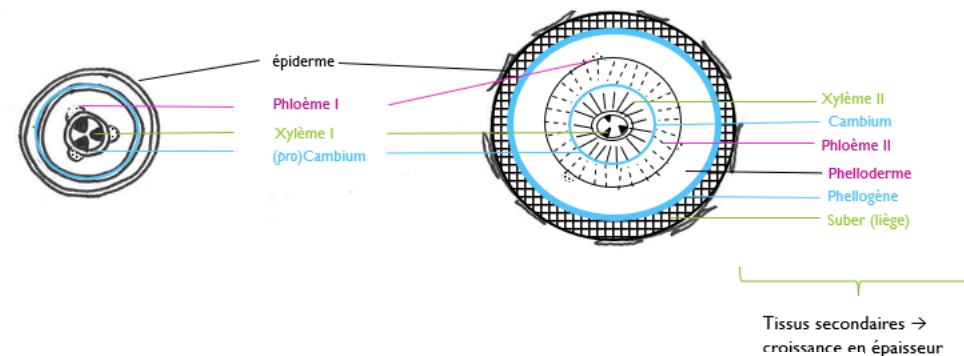
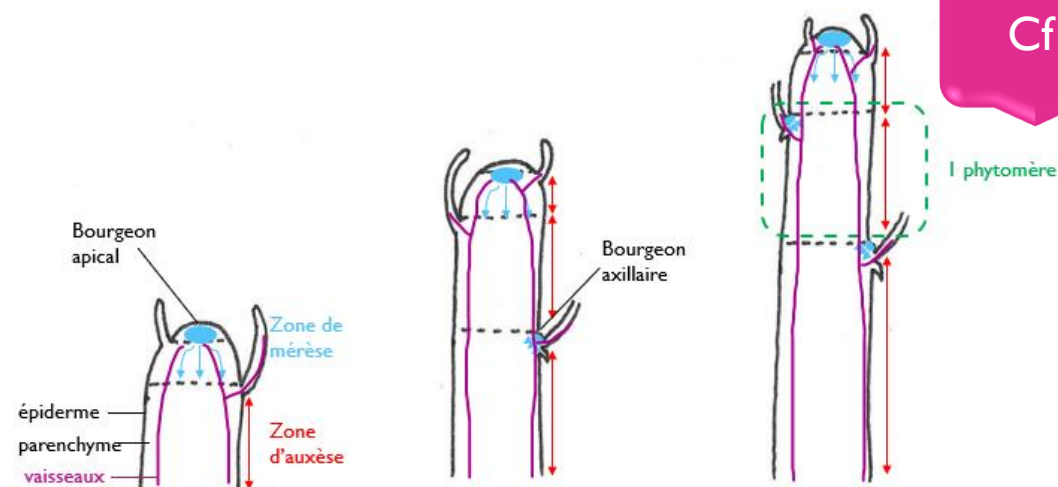
*Moelle = cylindre central = (péricycle + vaisseaux + tubes)*

*Coupe transversale d'une racine Dicotylédone, l'Hellebore (snv Jussieu)*



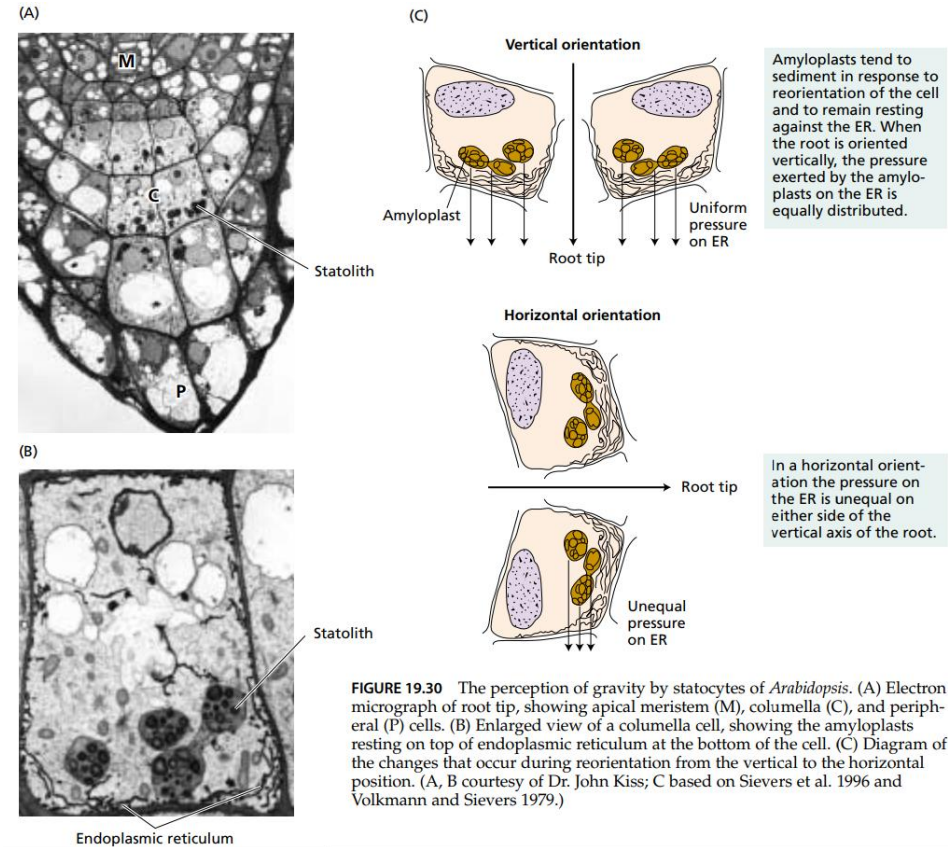
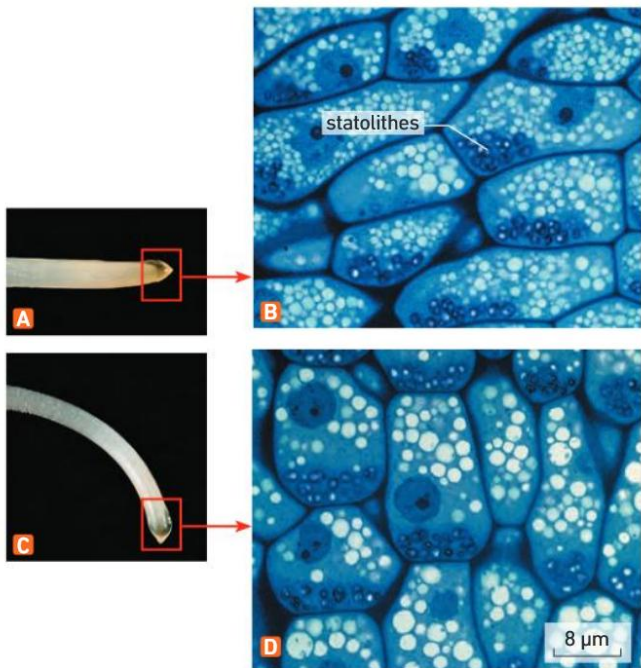
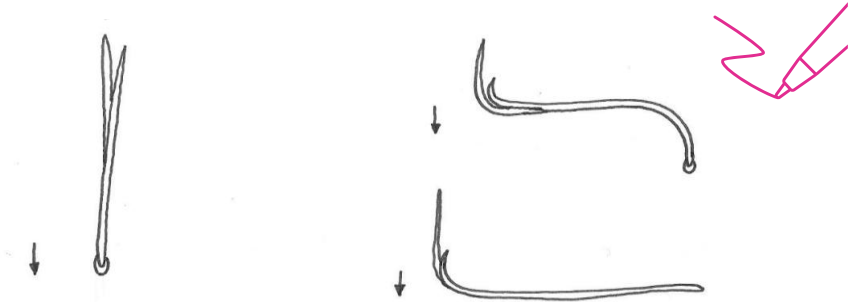


Méristèmes secondaires  
(cambium et phellogène →  
croissance en épaisseur)



## 4. Orientation de la croissance : exemple du gravitropisme

- Mise en évidence du rôle de la coiffe racinaire dans la perception du champ de gravité



Pointe racinaire vue au microscope (X10).  
 1-méristème  
 2-columelle (statocytes avec statolithes)  
 3-partie latérale de la coiffe  
 4-cellules mortes arrachées  
 5-zone d'élongation

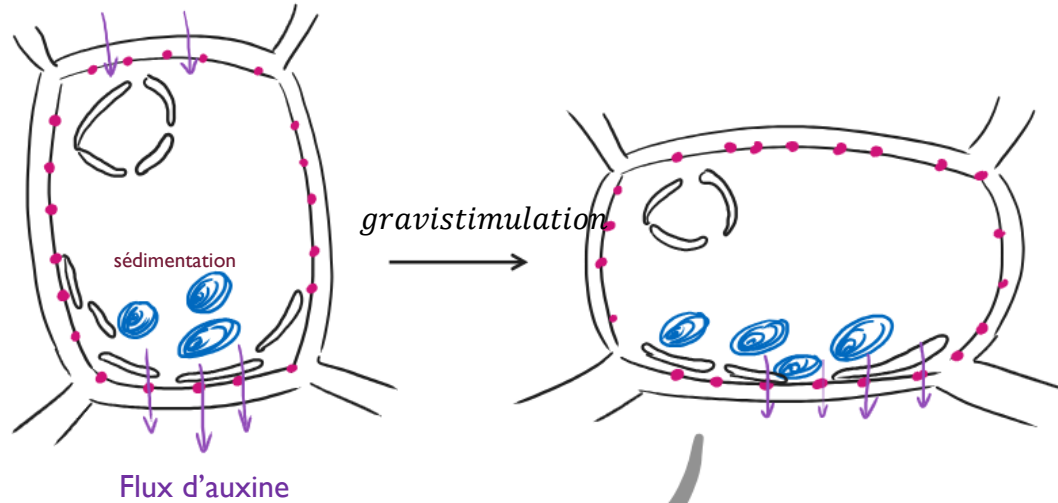
- la **columelle**, zone centrale de la coiffe, contient des cellules spécialisées appelées **statocytes**,
  - Statocytes = cellules polarisées : noyau « en haut »/ réticulum « en bas »
  - Statocytes = cellules riches en **amyloplastes** (densité > cytosol) → « vers le bas »
  - amyloplastes = sensible à la gravité= **statolithes**
- Mutants présentant des statolithes plus petits, ablation des statocytes... → absence de gravitropisme

Cellule de la columelle au cœur de la coiffe: statocyte

transporteur d'auxine  
(AIA pour Acide Indole Acétique)

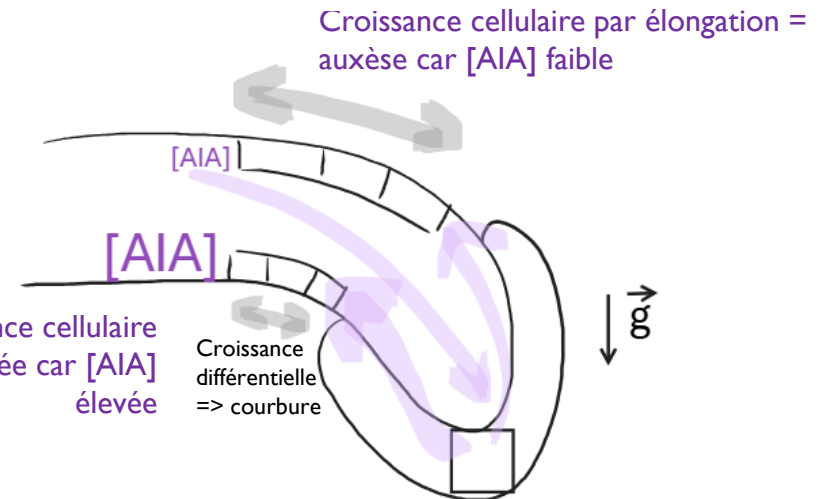
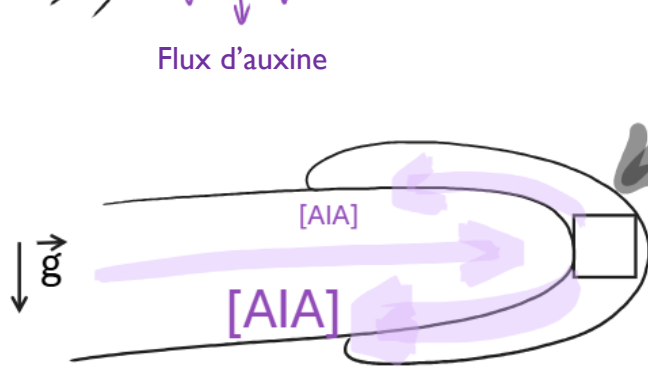
Statolithe=grain d'amidon  
Densité<sub>statolithe</sub> > densité<sub>cytosol</sub>

Réticulum endoplasmique  
et microfilaments d'actine  
(cytosquelette)



$\sigma \downarrow$

Action mécanique des statocytes sur réticulum endoplasmique et filaments d'actine => ouverture des transporteurs à Auxine (AIA) et => redistribution de l'AIA



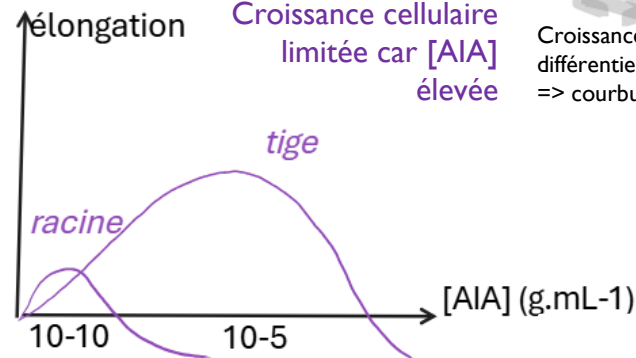
Croissance cellulaire par élongation = auxèse car [AIA] faible

Croissance cellulaire limitée car [AIA] élevée

Croissance différentielle => courbure

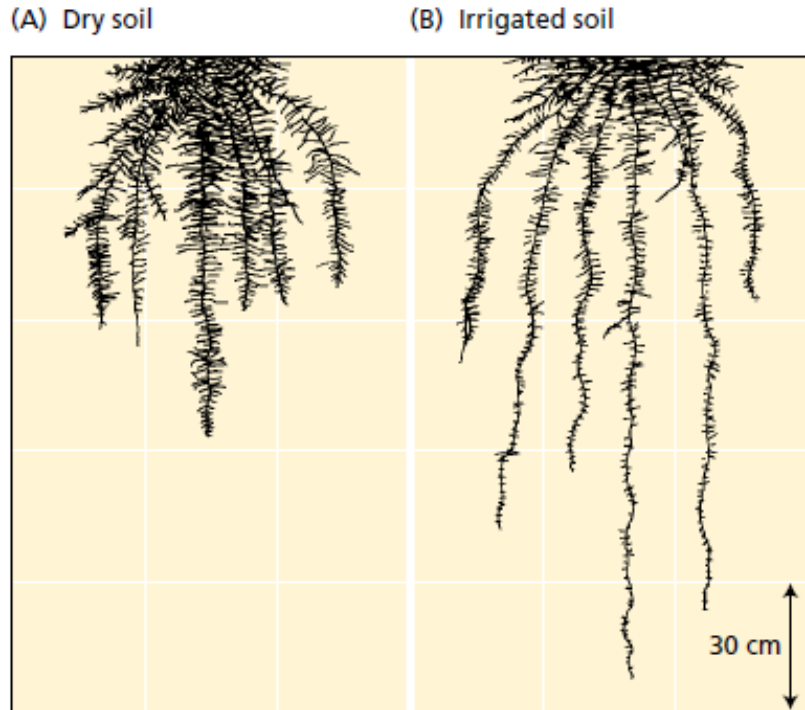
Gravitropisme +

L'auxine, une hormone végétale impliquée dans l'élongation (auxèse) et dont la distribution dépend du champ de pesanteur



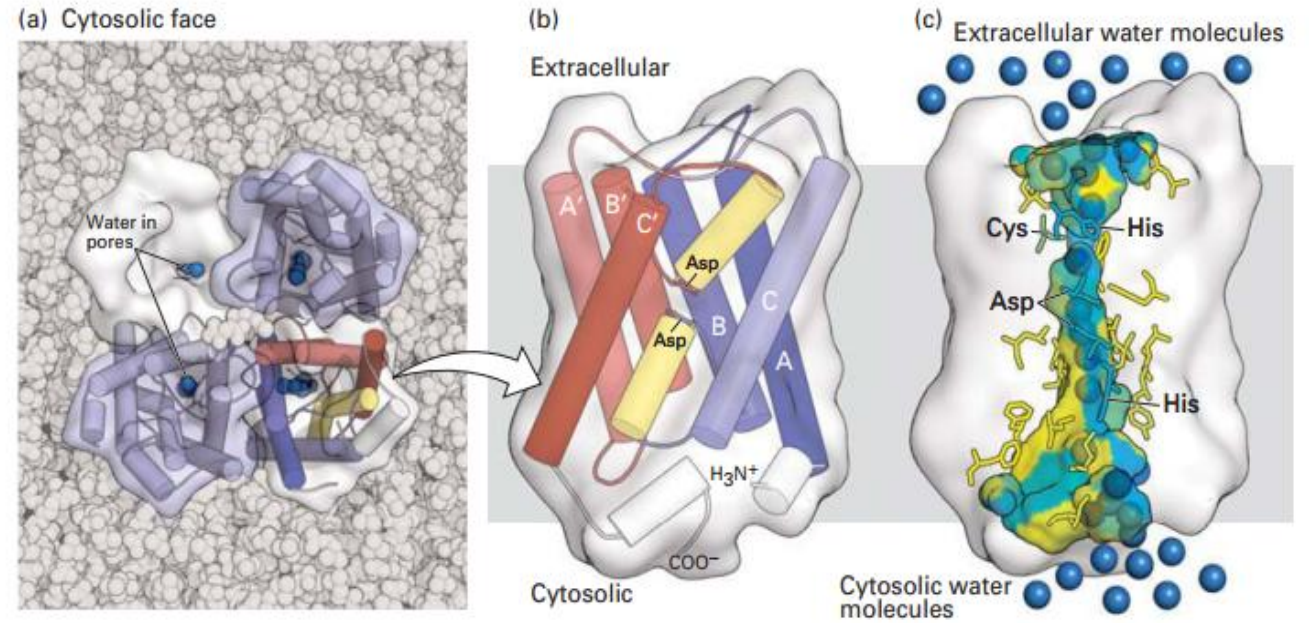
# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol



**FIGURE 5.6** Fibrous root systems of wheat (a monocot). (A) The root system of a mature (3-month-old) wheat plant growing in dry soil. (B) The root system of a wheat plant growing in irrigated soil. It is apparent that the morphology of the root system is affected by the amount of water present in the soil. In a fibrous root system, the primary root axes are no longer distinguishable. (After Weaver 1926.)

Figure 8 : mise en évidence du rôle des facteurs abiotiques (ici humidité du sol) dans la croissance racinaire, cas d'un système racinaire fasciculé de monocotylédone BCPST1- ENCPB - S. DALAINE



**FIGURE 11-8** Structure of an aquaporin. (a) Structural model of the tetrameric protein comprising four identical subunits. Each subunit forms a water channel, as seen in this view looking down on the protein from the exoplasmic side. One of the monomers is shown as a water-accessible surface model, in which the pore entrance can be seen. (b) Schematic diagram of the topology of a single aquaporin subunit in relation to the membrane. Three pairs of homologous transmembrane  $\alpha$  helices (A and A', B and B', and C and C') are oriented in the opposite direction with respect to the membrane and are connected by two hydrophilic loops containing short non-membrane-spanning helices and conserved asparagine (N) residues. The loops bend into the cavity formed by the six transmembrane helices, meeting in the middle to form part of the

water-selective gate. (c) Side view of the pore in a single aquaporin subunit, in which several water molecules (blue spheres) are seen within the 2-nm-long water-selective gate that separates the water-filled cytosolic and extracellular vestibules. The gate contains highly conserved hydrophilic amino acid residues whose side chains form hydrogen bonds with transported water molecules. The amino acids lining the pore are colored from hydrophilic (blue) to hydrophobic (yellow). The arrangement of these hydrogen bonds and the narrow pore diameter of 0.28 nm prevent passage of protons (i.e.,  $H_3O^+$ ) or other ions. See T. Zeuthen, 2001, *Trends Biochem. Sci.* **26**:77, and K. Murata et al., 2000, *Nature* **407**:599. [Data from H. Sui et al., 2001, *Nature* **414**:872, PDB ID 1j4n.]

Figure 7 : le rhizoderme présente des cellules riches en aquaporines, protéines transmembranaires transportant l'eau par diffusion facilitée

## Structure

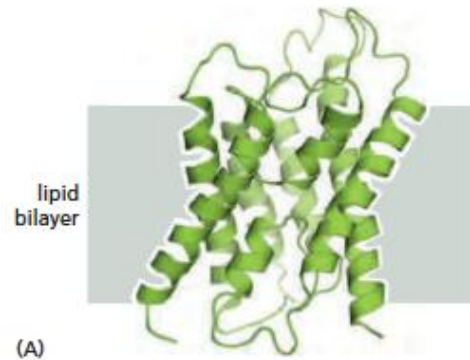
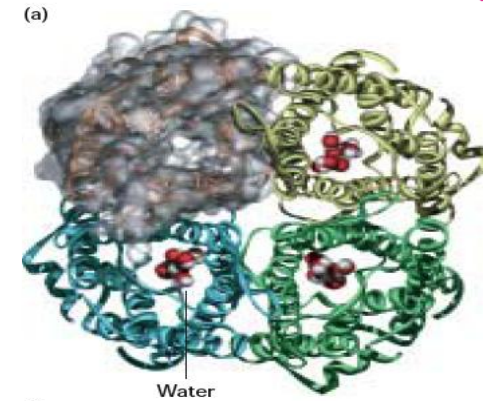
- Les aquaporines forment des tétramères
- Chaque monomère est constitué de :
  - ✓ 6 hélices alpha transmembranaires
  - ✓ Une boucle formée de 2 séquences NPA (Asn, Pro, Ala)
- Les hélices alpha d'un monomère forment un **pore** ( $\varnothing = 2 \text{ nm}$ )
  - ✓ Les AA tournés vers le pore sont hydrophiles
    - Canal hydrophile
    - Transport d'eau

→ Les aquaporines sont des canaux à eau

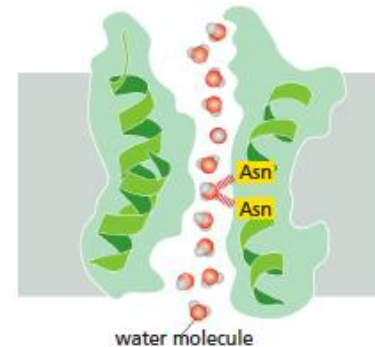


Structure des aquaporines AQP1. Incorporation de l'AQP1 dans un protéoliposome puis cryofracture et observation au MET

Modèle d'organisation de l'aquaporine

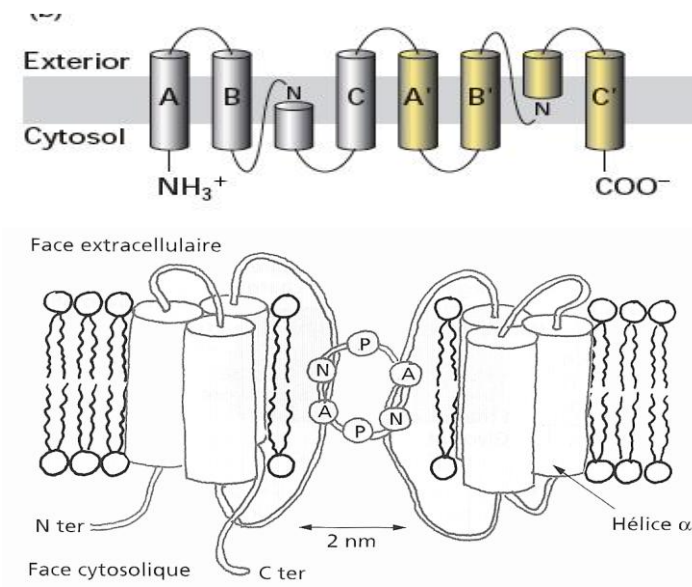


(A)



(B)

Modèle d'organisation d'un monomère



### I.3. La diffusion de l'eau peut être facilitée par les aquaporines

#### Fonctionnement

Passage de l'eau dans le pore, en files de molécules

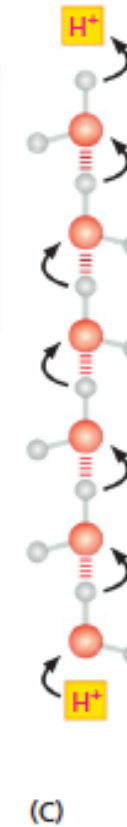
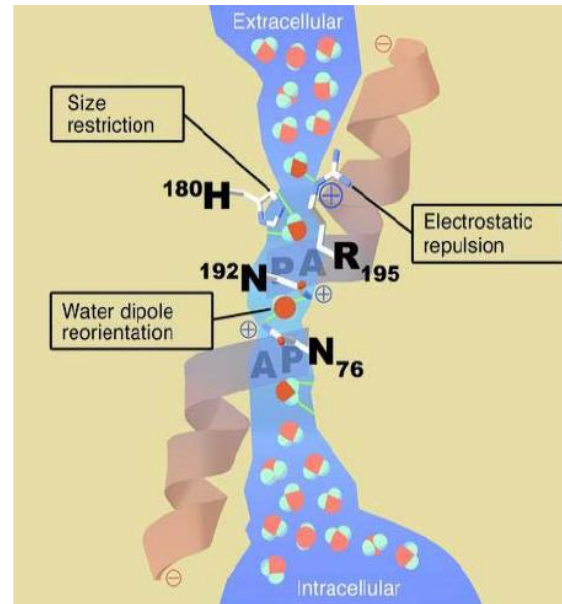
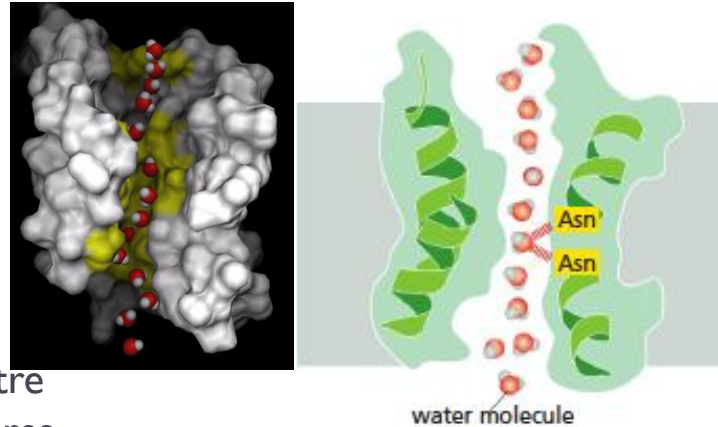
- L'eau passe dans le pore sous la forme d'une **file de molécules d'eau alignées**.

- ✓ Les AA hydrophiles orientés vers le centre du pore forment des liaisons H transitoires avec l'eau (via groupement carbonyle)
  - Stabilisation et alignement des molécules
- ✓ Les Asn des boucles NPA au milieu du canal mobilise une molécule d'eau
  - polarisation de toute la file d'eau

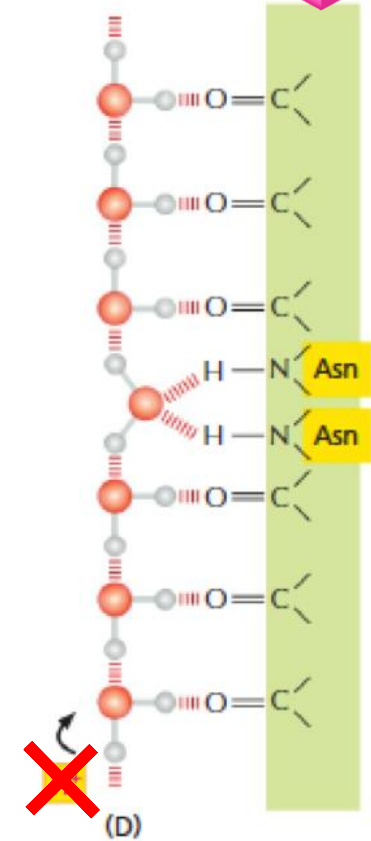
- Le pore est **imperméable à  $H^+$** 
  - ✓ L'organisation des molécules d'eau alignées et liées par liaisons H bloque le passage de  $H^+$  ( $\neq$  eau libre)

- Le pore est **imperméable aux ions hydratés** (trop gros)

- Transport par **diffusion**, dans le sens des  $\psi_H$  décroissants



(C)



(D)

(C) Transfert de  $H^+$  dans l'eau libre  
(D) Interactions entre l'eau et les AA hydrophile du pore; blocage des  $H^+$

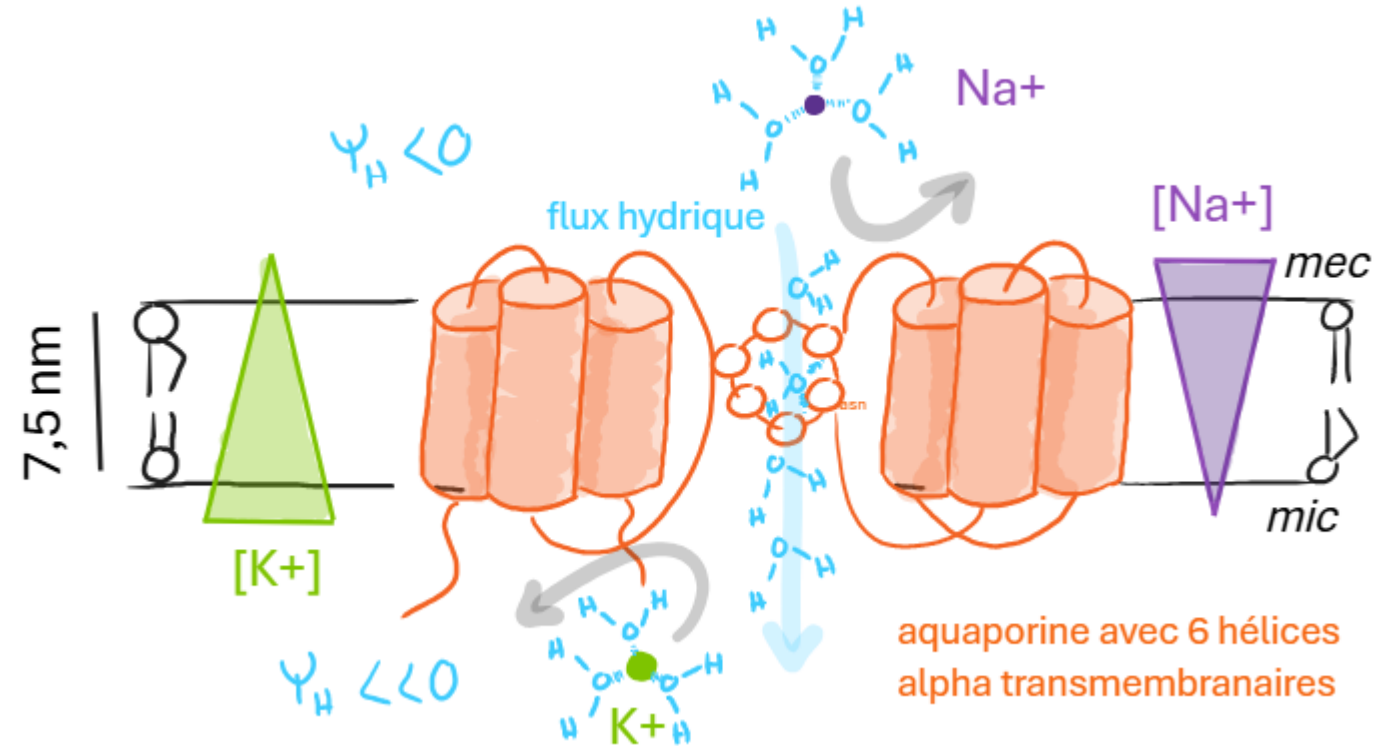
**Vitesse de transport** :  $10^9$  molécules d'eau par sec et par AQP (tétramère)

## Bilan

- Les AQP sont **spécifiques** à l'eau
- Transport d'eau dans un sens ou dans l'autre, **par diffusion selon le gradient de potentiel hydrique**
- Plus de 200 aquaporines différentes, des plantes aux animaux

Elles interviennent dans l'approvisionnement en eau des cellules, dans les processus de turgescence donc de croissance cellulaire des végétaux par ex.

Régulation de la présence des aquaporines :  
Phosphorylation



Modèle de fonctionnement d'une aquaporine (ex: cellule du glomérule rénal de grenouille) (S. Dalaine)

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

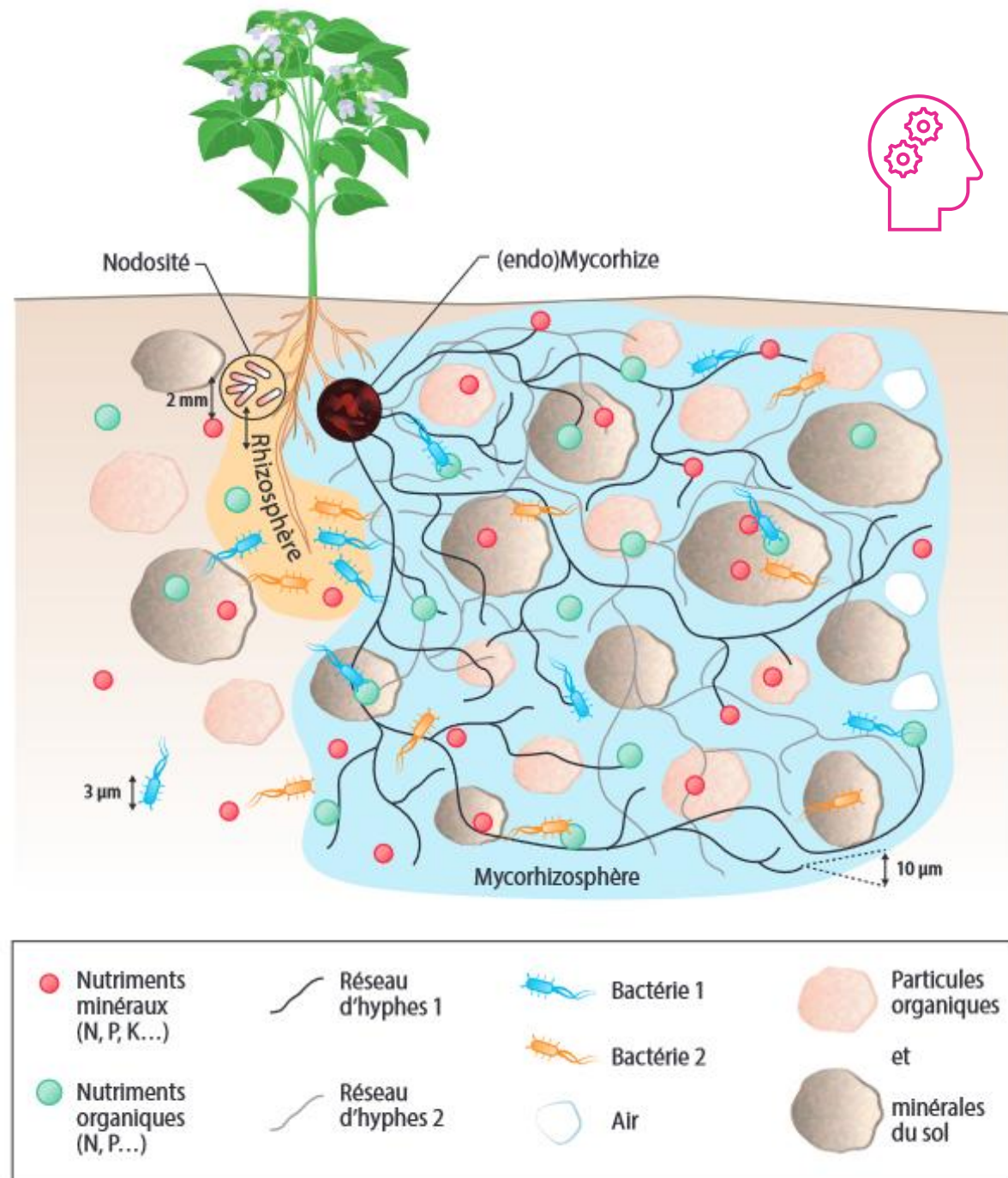
#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

- Mycorhize= symbiose = relation mutualiste entre angiosperme photosynthétique et champignon doté de nombreux filaments mycéliens très fins et étendus
  - plante chlorophyllienne: **approvisionnement** du champignon en matière organique issue de la photosynthèse
  - champignon: ↗ volume de la **rhizosphère** + sécrétion d'**antibiotiques** (protection de la plante contre certaines bactéries pathogènes) + production de **facteurs de croissance**.



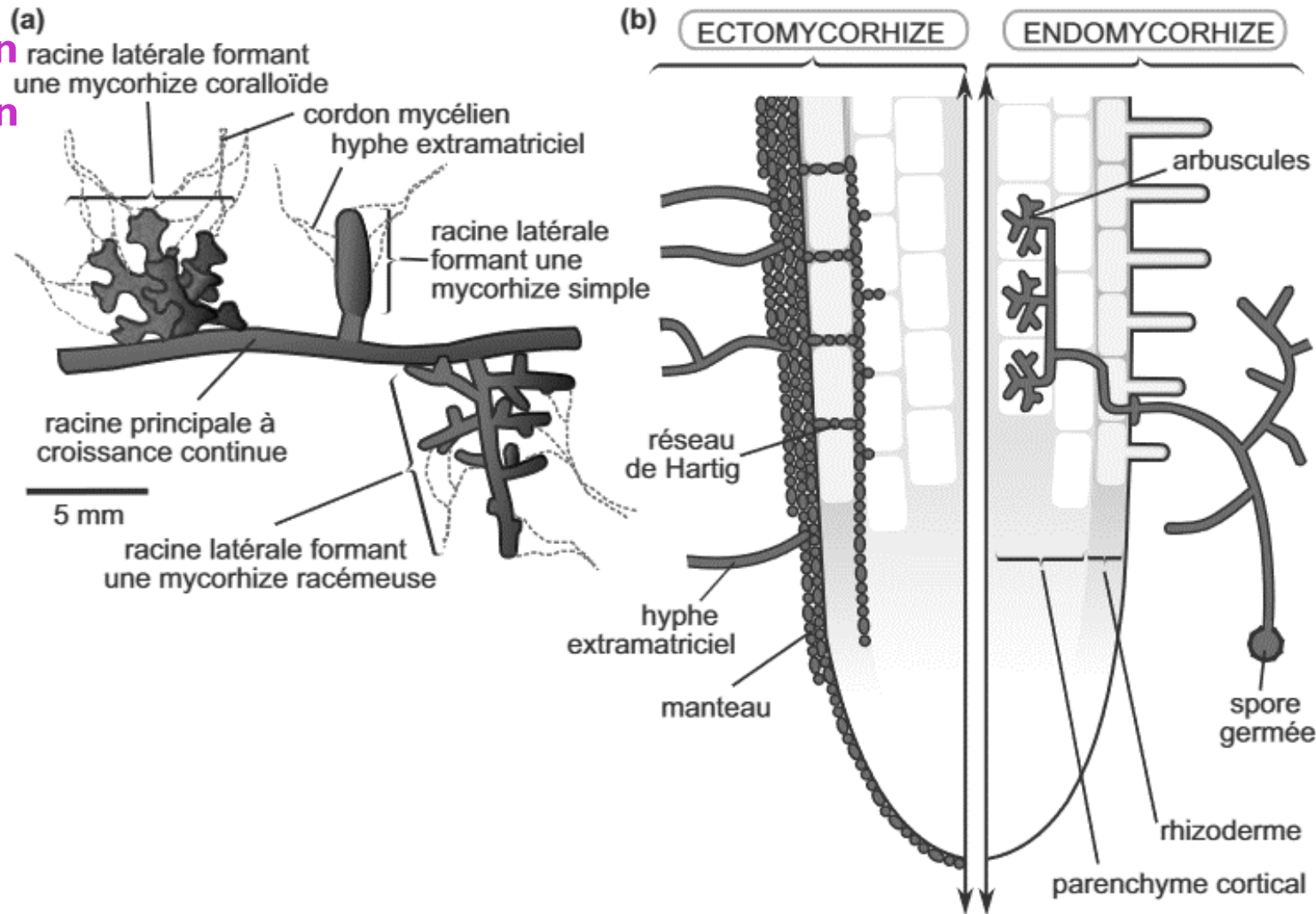
# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### ■ Ectomycorhizes:

- 10% des végétaux
- très représentées par exemple chez les **gymnospermes** comme le pin
- manchon externe : **réseau de Hartig**, pas de pénétration dans les tissus racinaires.

✓ Ex: truffe, cèpe



# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

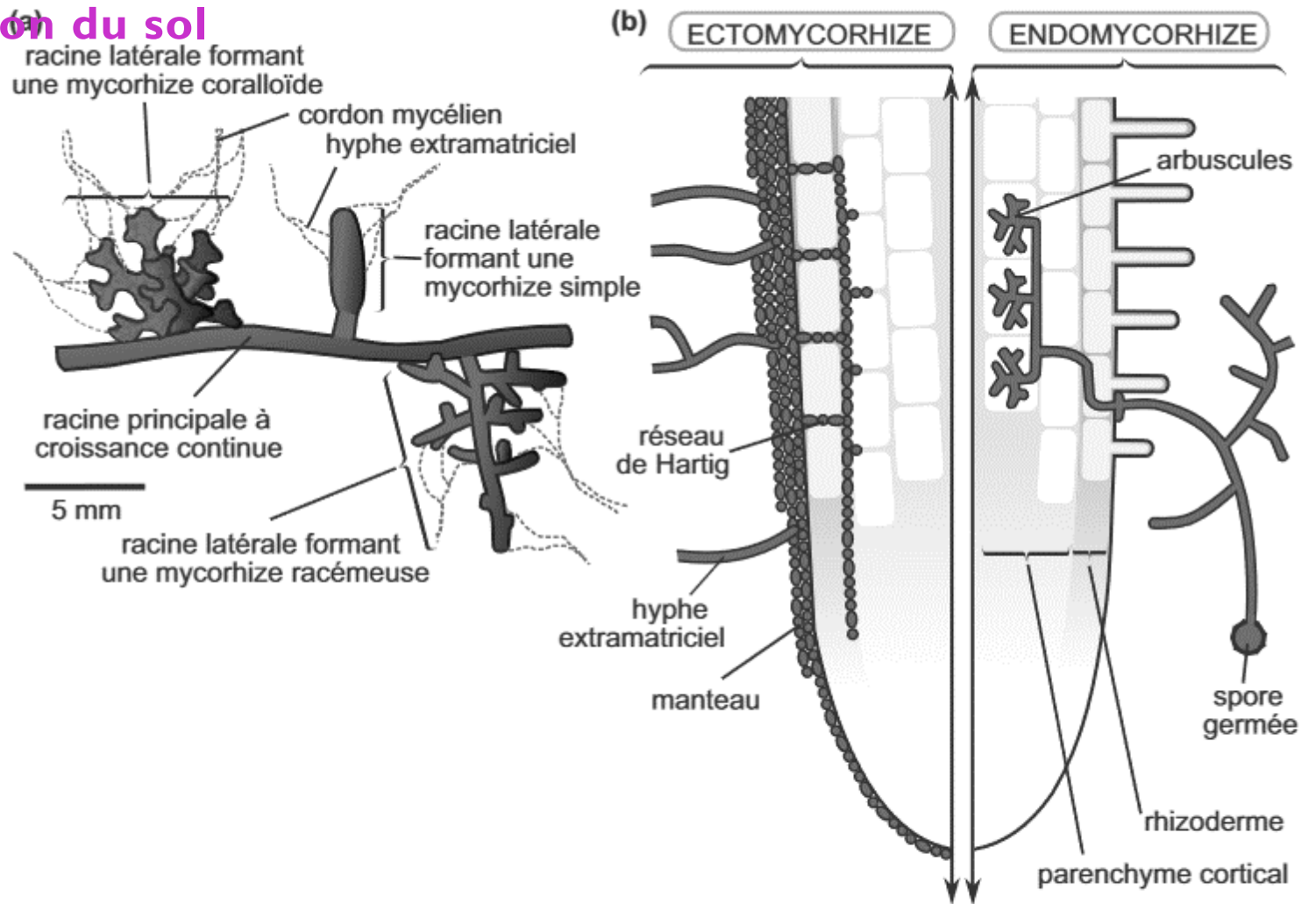
### ■ Endomycorhizes,:

- 80% des espèces végétales
- arbuscules et vésicules en contact étroit avec les membranes plasmiques des cellules végétales
- Pénétration dans les tissus racinaires à l'intérieur des parois cellulaires
- ne traverse pas la membrane plasmique des cellules végétales

■ certaines familles d'Angiospermes incapables d'établir des relations avec les champignons mycorhiziens.

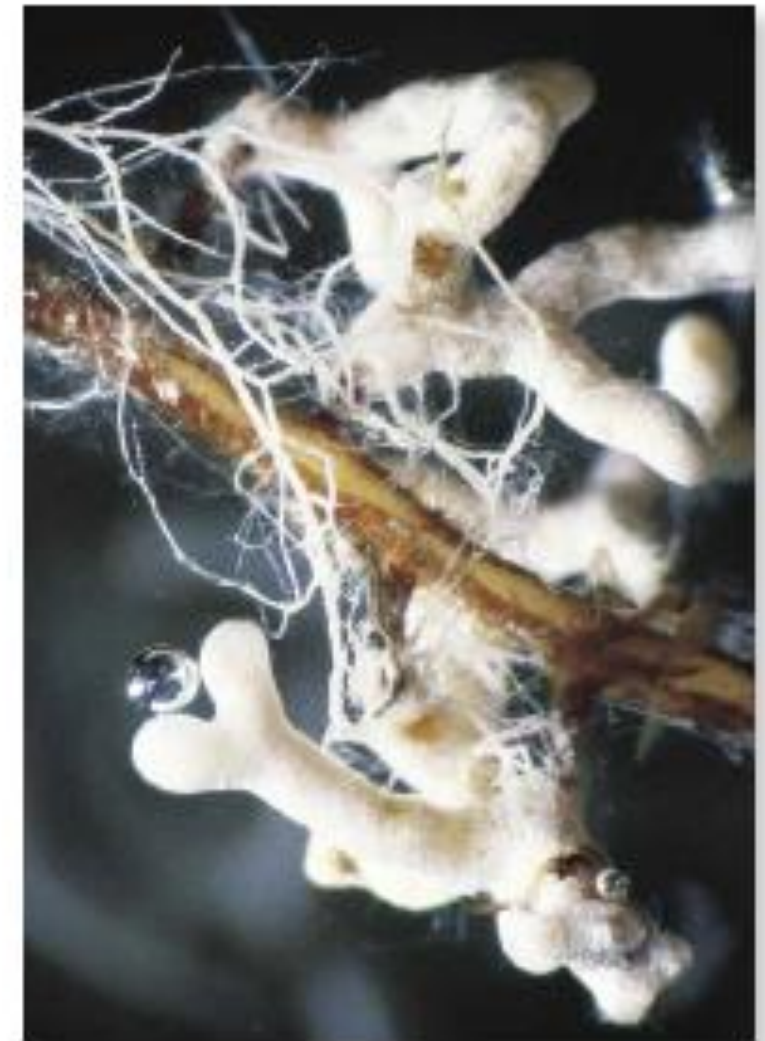
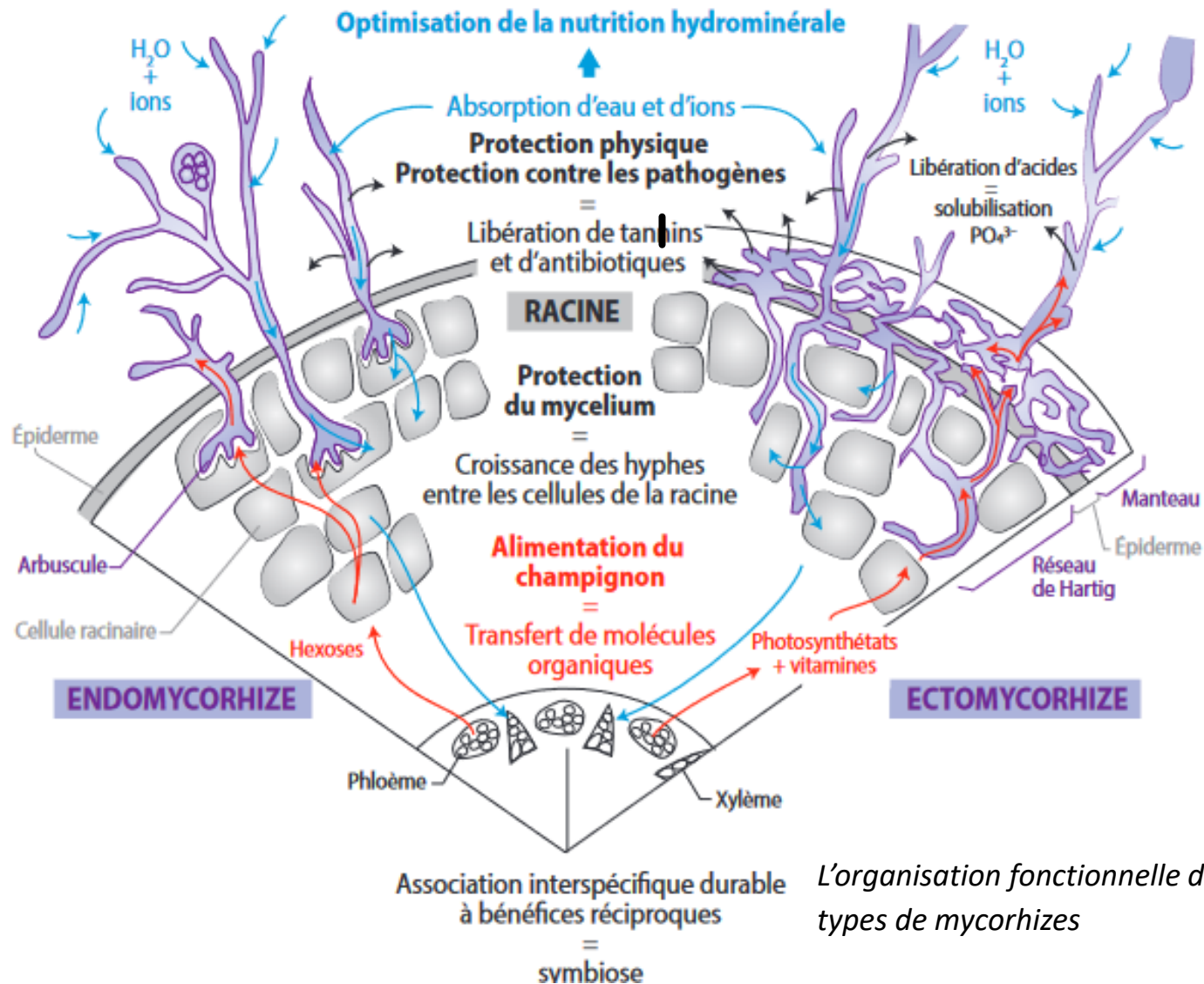
⇒ Brassicacées (chou, moutarde, colza...)

⇒ zone pilifère importante



## A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

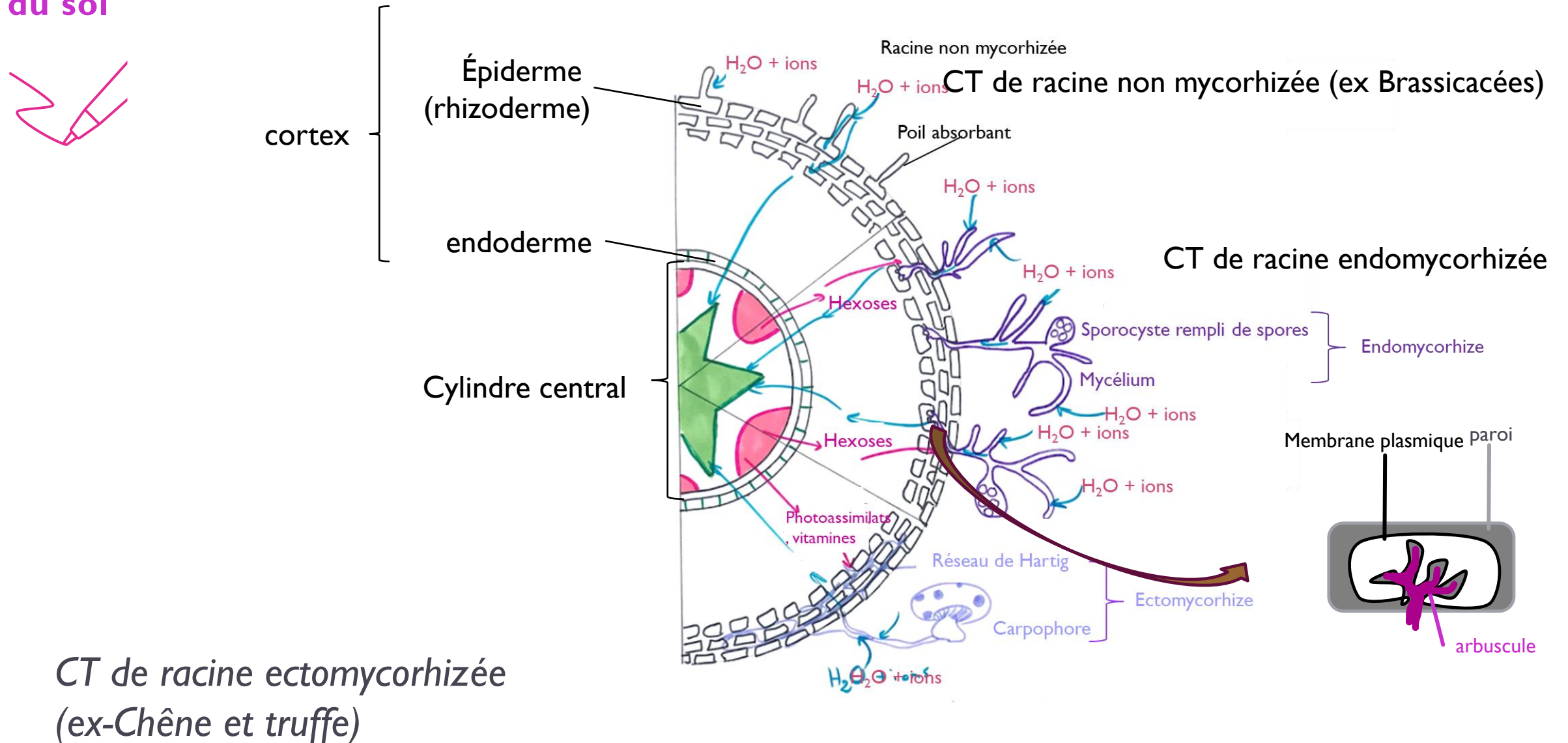
### 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol



**29-1 Mycorrhizas** The fungus *Boletus parasiticus* forms ectomycorrhizas, seen here as sheaths surrounding the roots of a red pine (*Pinus resinosa*). The narrow strands of mycelium serve as extensions of the roots. Mycorrhizas benefit their host plants by increasing uptake of water and essential elements, especially phosphorus. Mycorrhizas also provide protection against attack by pathogenic fungi and nematodes. This striking image was achieved by photographing the roots under water—hence the air bubbles.

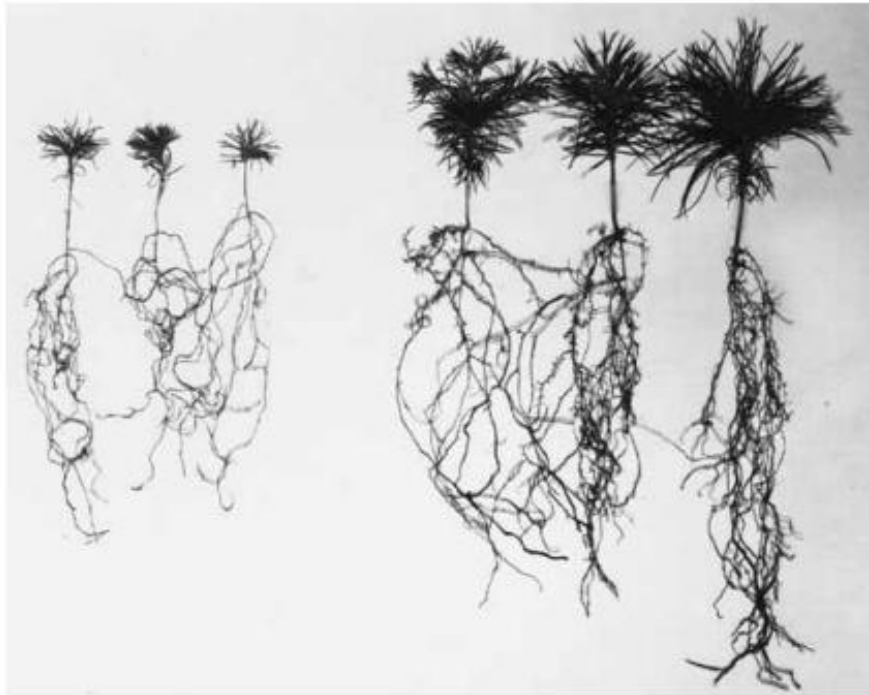
# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

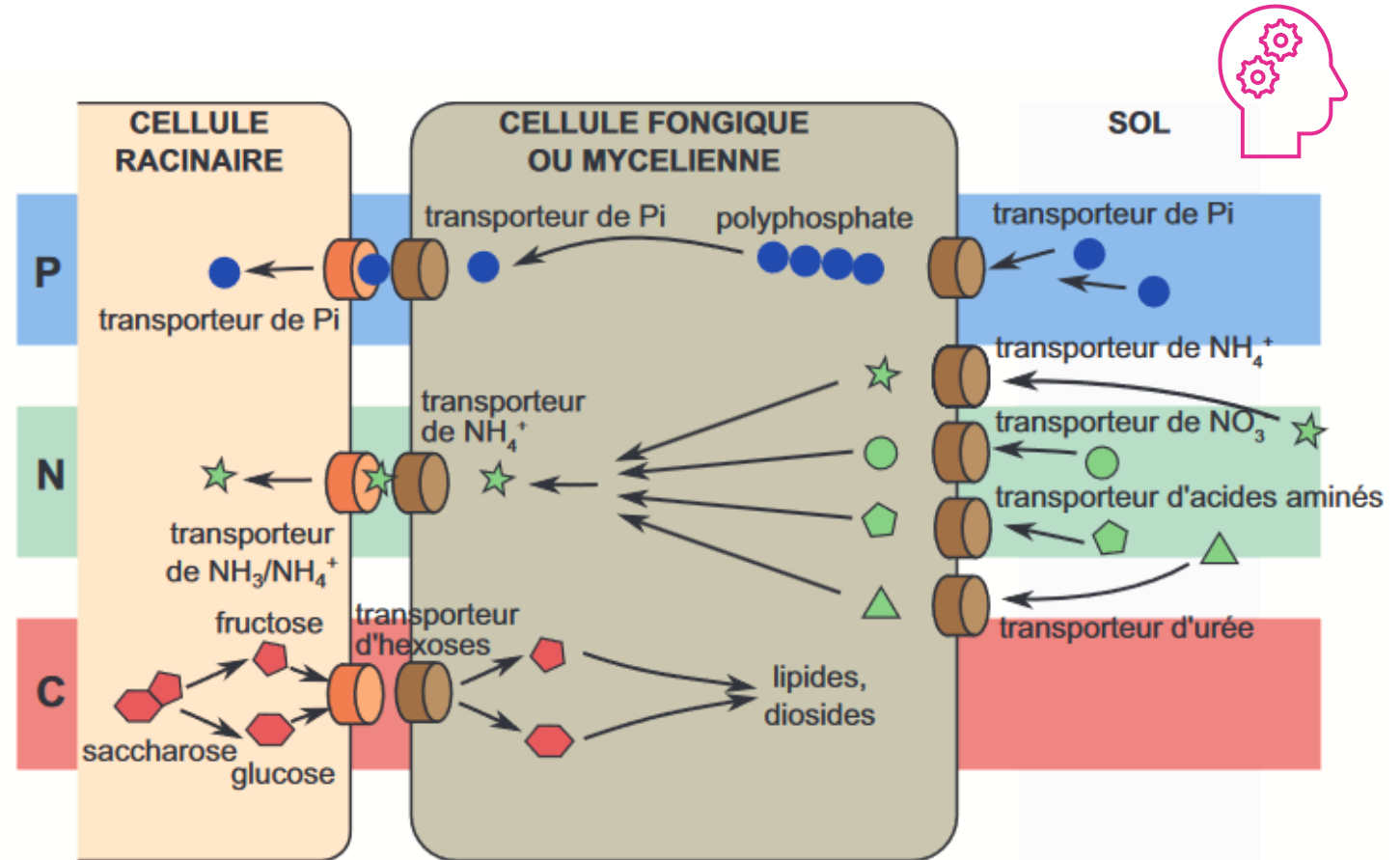


# A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

## 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol



**14-42 Mycorrhizas and tree nutrition** Nine-month-old seedlings of white pine (*Pinus strobus*) were raised for two months in a sterile nutrient solution and then transplanted to prairie soil. The seedlings on the left were transplanted directly. The seedlings on the right were grown for two weeks in forest soil containing fungi before being transplanted to the prairie soil.

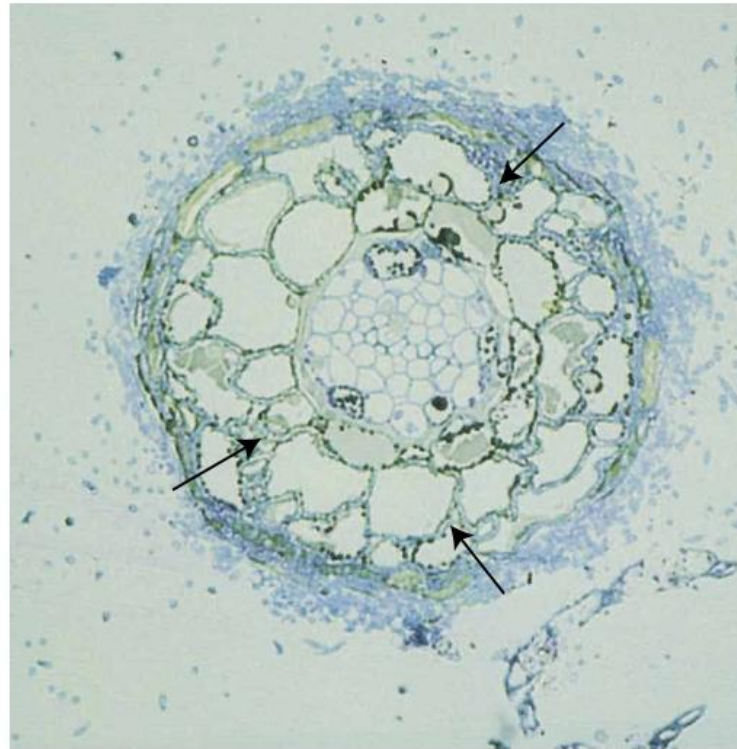


Les principaux échanges au niveau d'une mycorhize.

Figure 12 : les principaux échanges au niveau d'une mycorhize (Dunod, J'intègre, ed. 2021)

## A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

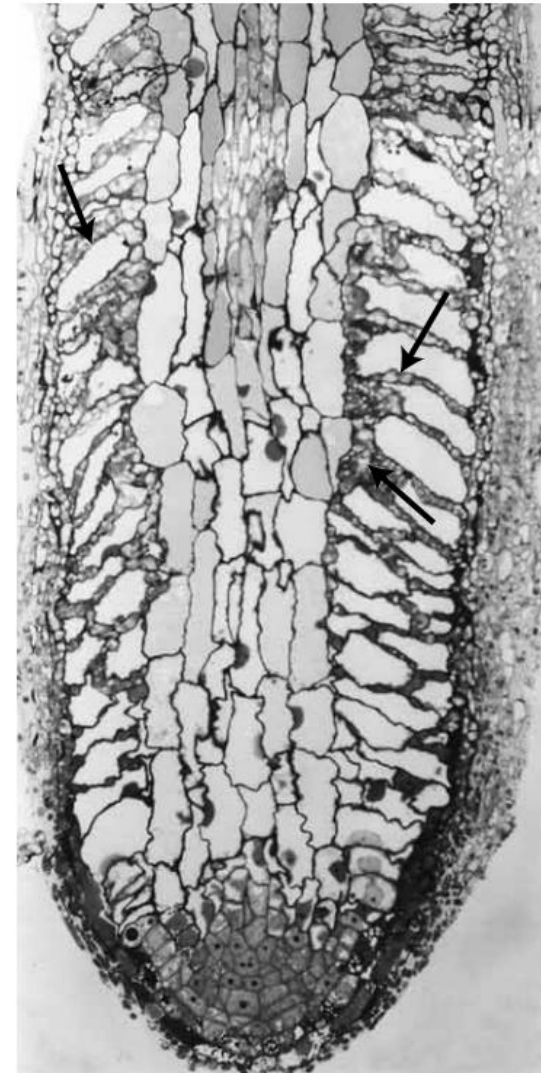
### 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol



(a)

50  $\mu$ m

**14–46 Ectomycorrhizal sections** (a) Transverse section of an ectomycorrhiza of *Pinus*. The hyphae of the fungus form a mantle around the root and also penetrate between the epidermal and cortical cells, where they form the characteristic Hartig net (arrows). (b) Longitudinal section of ectomycorrhiza of the North American beech (*Fagus grandifolia*). The fungus ensheathes the root, forming a mantle around it. The Hartig net (arrows) is confined to the layer of radially enlarged epidermal cells.

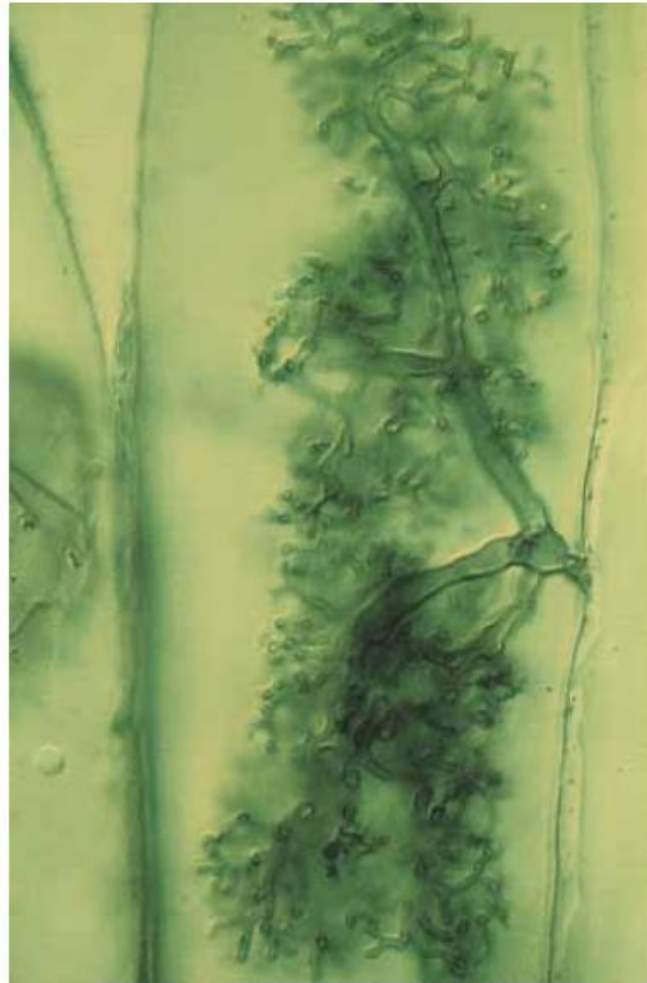


(b)

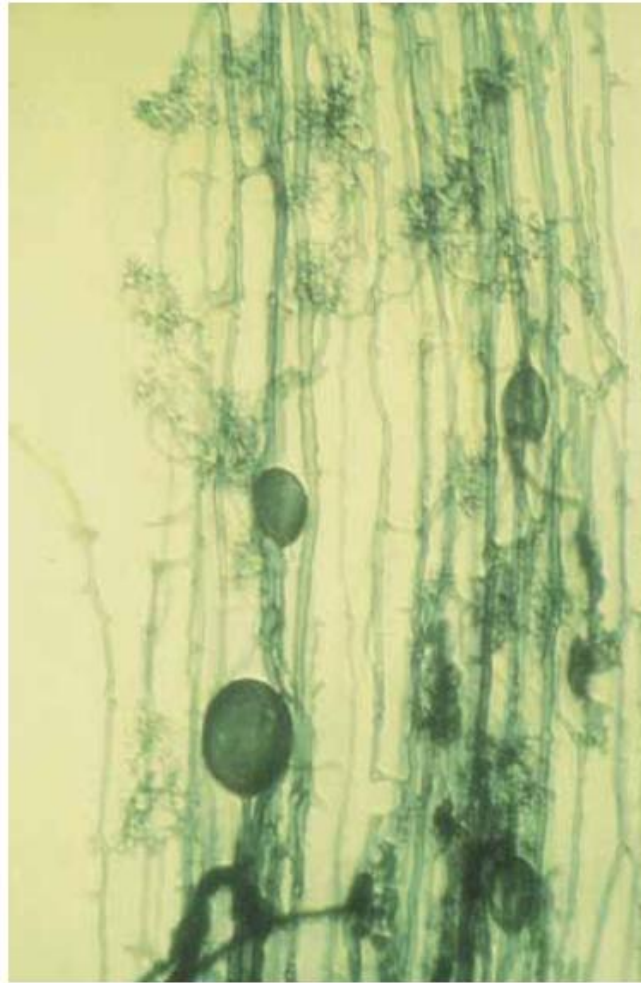
50  $\mu$ m

## A. LA RACINE, LIEU D'ABSORPTION DE L'EAU ET DES IONS

### 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol



(a)



(b)

**14-43 Endomycorrhizas** *Glomus versiforme*, a glomeromycete, is shown here growing in association with the roots of leeks (*Allium porrum*). **(a)** Arbuscules growing inside a leek root cell. **(b)** Arbuscules (highly branched structures) and vesicles (dark, oval structures). Arbuscules predominate in young infections, with vesicles becoming common later.

L'appareil souterrain des végétaux présente donc, directement ou indirectement, une grande surface au contact de la solution du sol. Comment celle-ci est-elle absorbée ?

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques



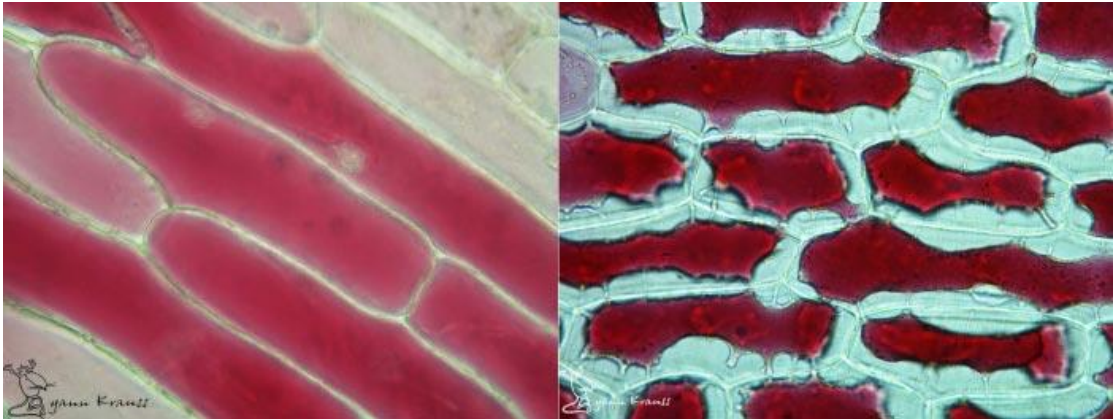
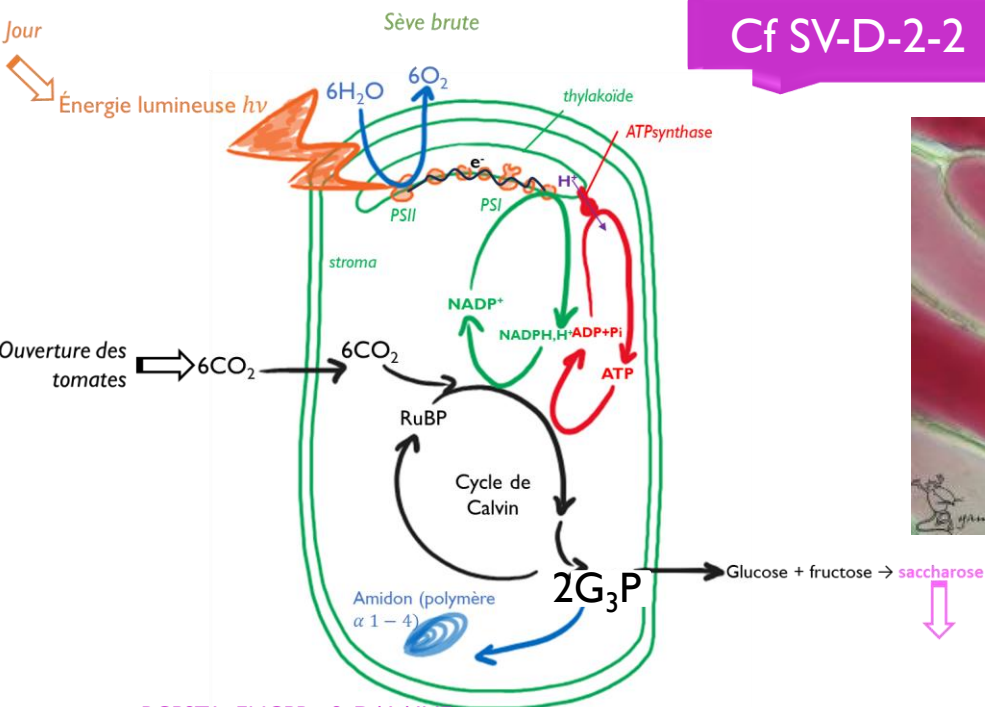
## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

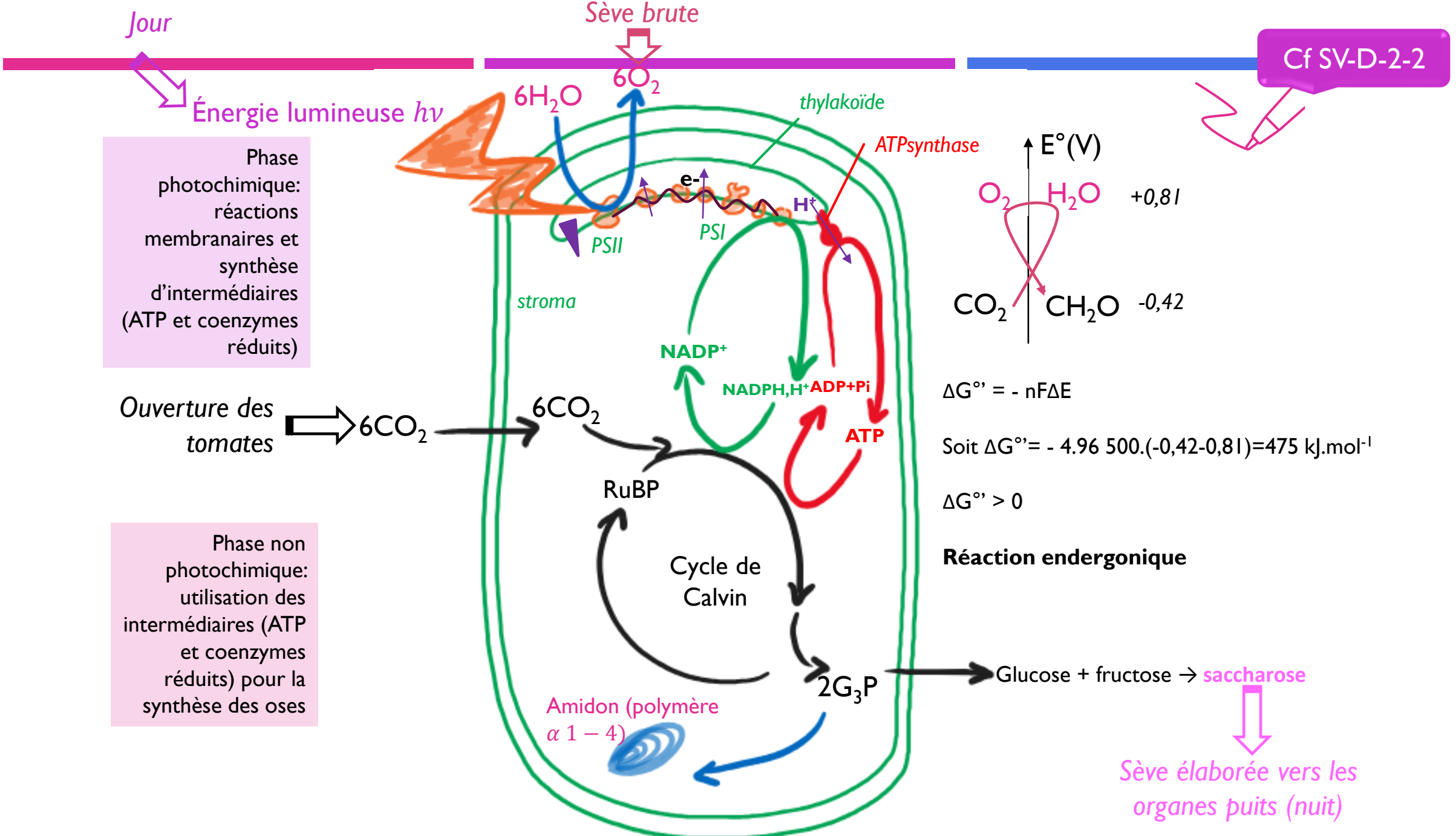
### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

■ L'eau ainsi absorbée joue 3 rôles :

- turgescence des cellules  $\Rightarrow$  forme des cellules et port du végétal
- fluide porteur d'ions et de molécules utilisées par le métabolisme cellulaire
- réactif de la photosynthèse

Cf SV-D-2-2

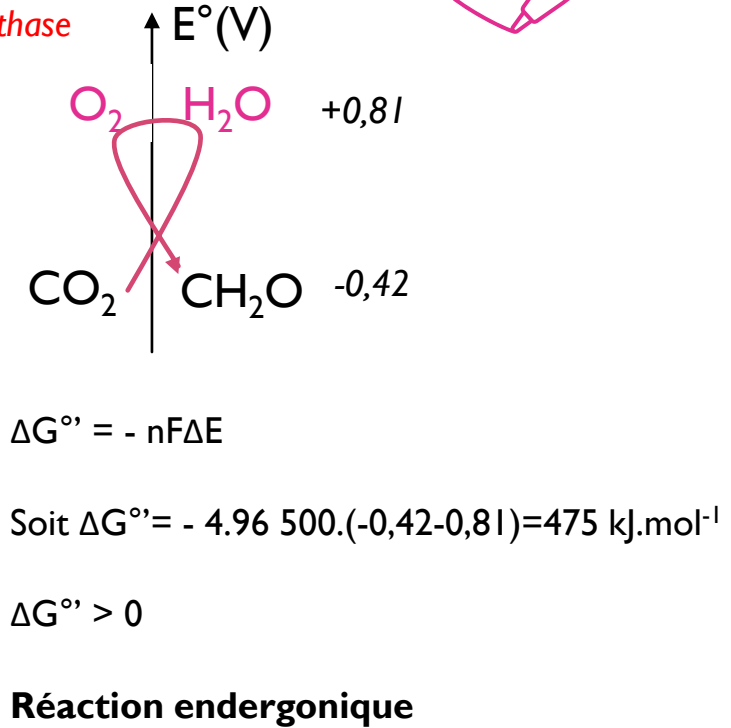




Phase photochimique: réactions membranaires et synthèse d'intermédiaires (ATP et coenzymes réduits)

Ouverture des tomates → 6CO<sub>2</sub>

Phase non photochimique: utilisation des intermédiaires (ATP et coenzymes réduits) pour la synthèse des oses



Glucose + fructose → **saccharose**  
 ↓  
 Sève élaborée vers les organes puits (nuit)

Formation d'oses au cours de la photosynthèse

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

- Le **potentiel hydrique** permet de déterminer le **sens des déplacements d'eau**
- Le potentiel hydrique décrit le **statut hydrique** de l'organe, de la cellule
- Il est équivalent à une **pression** → unité : **Pa**



**Potentiel hydrique (Pa)** →  $\psi = \psi_S + \psi_P + \psi_m + \psi_g$

**Potentiel de gravité**  
Dépend de la position de l'eau dans le champ gravitationnel (Pa)  
 $= \rho gh$

**Potentiel osmotique**  
Dépend de la concentration en solutés (Pa)  
 $\psi_S = -\pi$

**Potentiel de pression hydrostatique**  
Dépend de la pression hydrostatique exercée par l'eau (Pa) = P pression mécanique exercée par la paroi

**Potentiel matriciel**  
Dépend des forces de rétention exercées par la matrice (forces d'imbibition et de capillarité) (Pa)

Dans une cellule végétale

$$\psi \approx \psi_S + \psi_P$$

$$\psi \approx -\pi + P$$

$$-R.T.C_{\text{osm}} \cdot 10^3 \quad P - P_{\text{atm}}$$

$$1 \text{ L} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$\pi$  : Pression osmotique

$P$  : Pression mécanique exercée par la paroi

$C_o$  : osmolarité → quantité de particules de solutés par litre (osmomol.L<sup>-1</sup>)

$P$  : pression reçue par l'eau du système (Pa)

$P_{\text{atm}}$  : pression atmosphérique (Pa)

- Eau pure** :  $\psi = 0$

→ Les potentiels hydriques sont **toujours**  $< 0$

- L'eau se déplace toujours selon les **potentiels hydriques décroissants**

→ mouvement spontané

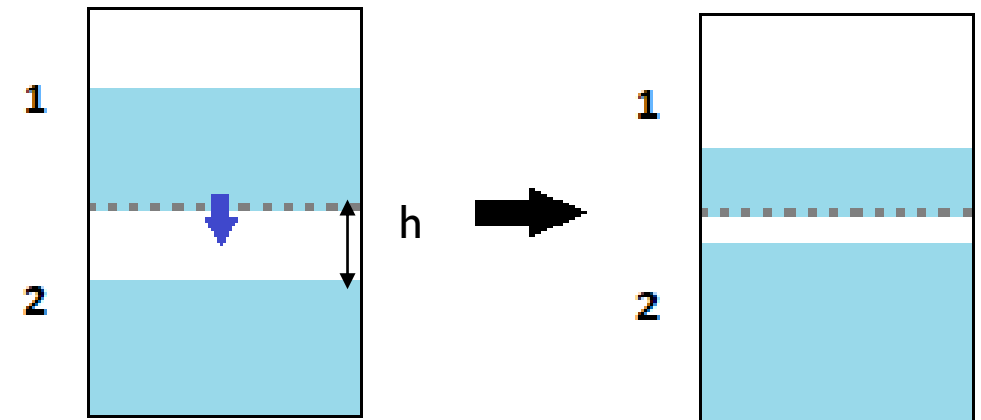
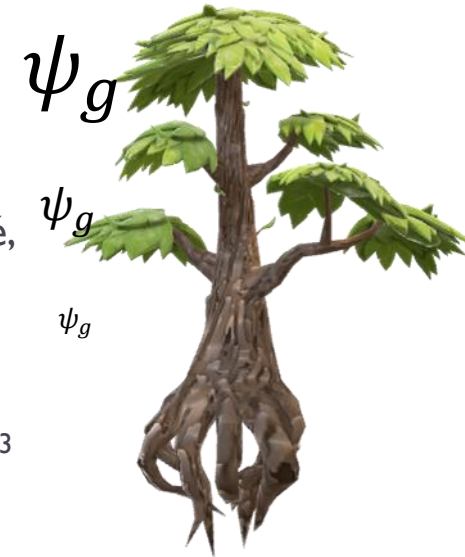
- Potentils hydriques **décroissants du sol vers l'atmosphère** : **-0,3MPa pour le sol, jusqu'à -10/-100MPa pour l'atmosphère** (fonction de l'humidité de l'air)<sup>35</sup>

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

$$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

- **Potentiel gravitaire**  $\psi_g = \rho \cdot g \cdot h$  : L'eau se dirige en fonction de la gravité, donc du haut vers le bas
- $\psi_g > 0$  donc plus on se place en hauteur dans l'arbre, plus  $\psi_g$  est grand
- $\psi_g = \rho \cdot g \cdot h$ , avec  $h$  l'altitude et  $\rho$  la masse volumique de l'eau cad  $1000 \text{ kg/m}^3$  ( $1 \text{ m}^3$  d'eau = 1000 litres pèsent 1 tonne soit 1000 kg)
  - $\psi_g = 10\,000 \text{ Pa/m} = 0,01 \text{ MPa/m}$
  - ⇒  $\psi_g$  négligeable à l'échelle cellulaire
  - ⇒  $\psi_g$  à prendre en compte pour des organes de taille  $> 10 \text{ m}$
- **L'eau se dirige vers le bas donc vers les  $\psi_g$  décroissants**
  - **composante gravitaire uniquement pour des flux d'eau verticaux**  $> \text{à } 10\text{m}$  (ex : montée de la sève brute des racines aux feuilles d'un arbre)
  - Pour des flux d'eau horizontaux (ex : au sein d'une racine) elle est négligeable.



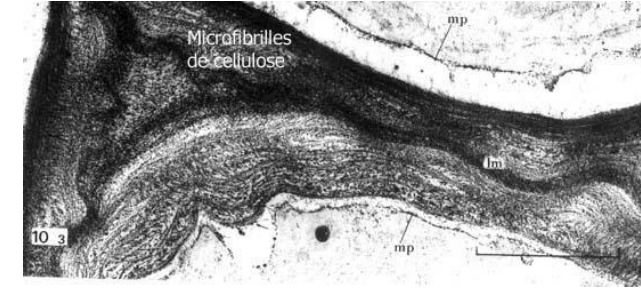
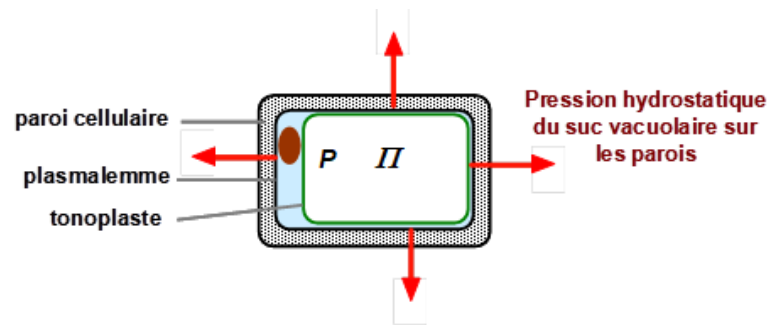
Le potentiel gravitaire induit un passage de l'eau du compartiment 1 vers 2 ssi  $h > 10 \text{ m}$

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

$$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

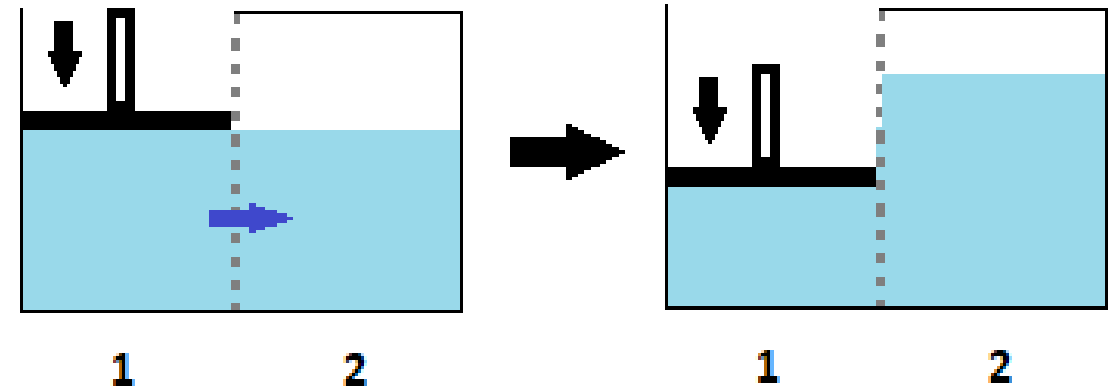
- **Potentiel de pression hydrostatique**  $\Psi_p$  dans la cellule = **pression de turgescence** (souvent notée P)
- $\Psi_p > 0$
- pression hydrostatique ssi **existence d'une paroi pectocellulosique** qui **résiste à cette pression** et ainsi empêche la membrane plasmique d'exploser sous la pression.
- paroi indispensable car cellules végétales vivent dans milieu hypotonique
  - ⇒ Risque d'entrée d'eau et d'éclatement (cf fantômes d'hématies)
  - ⇒ **Paroi s'oppose à entrée d'eau**
- $\psi_p = 0,4$  à  $0,6$  MPa dans les racines,  $1,5-2$  MPa (15-20 bars cf 2 bars dans pneus d'une voiture) dans les feuilles



Electronographie au MET de paroi végétale (lm: lamelle moyenne, mp: membrane plasmique)

Schéma simplifié de la cellule végétale : forces de pression hydrostatique s'exerçant sur sa paroi.

<https://www.plantes-et-eau.fr/documentation/etats-et-transferts-hydriques-dans-et-a-travers-la- plante/18-la-cellule-en-tant-que-compartiment-hydrique/11-le-potentiel-hydrique-de-la-cellule-et-ses-composantes>



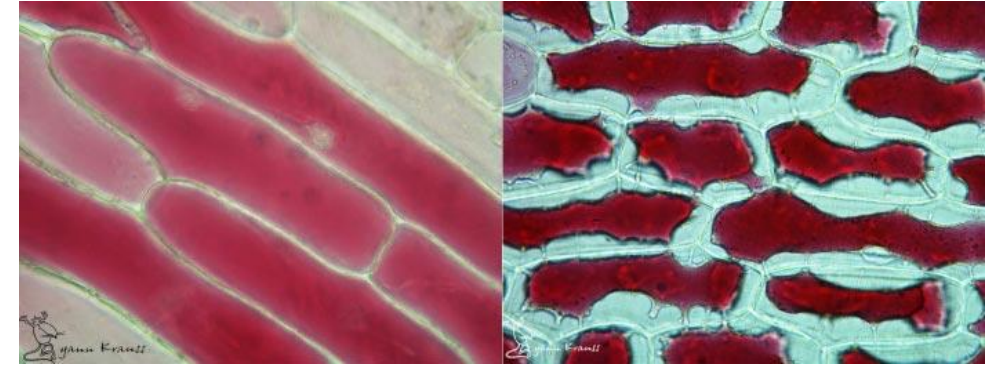
Le potentiel de pression hydrostatique (ici exercé par le piston) induit un passage de l'eau du compartiment 1 vers 2  
Piston ~ paroi: s'oppose à l'entrée d'eau

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

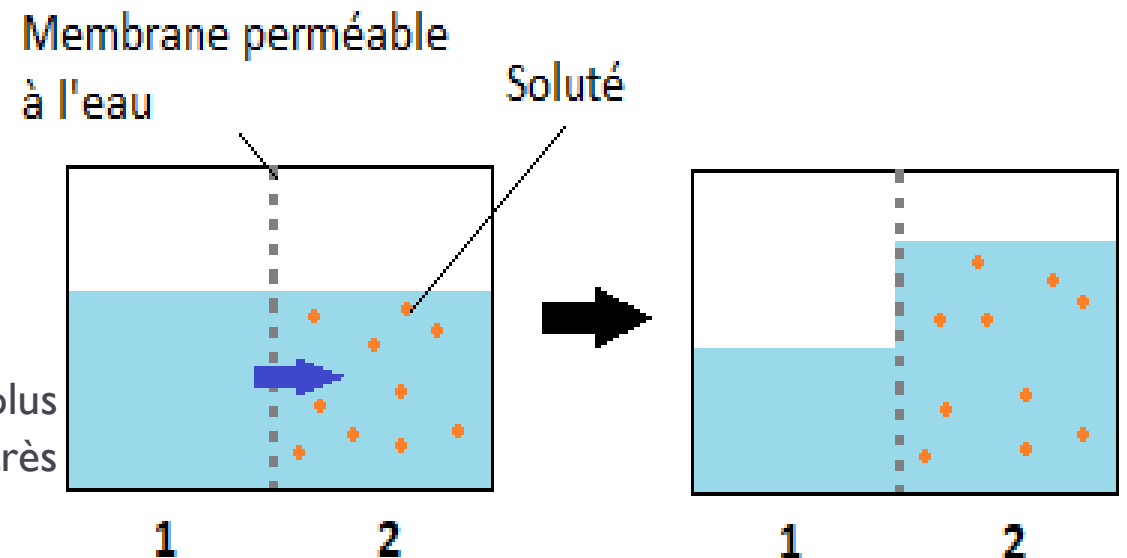
### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

$$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

- **Potentiel osmotique**  $\psi_s = -\pi$  avec  $\pi$  : pression osmotique
- $\pi = R.T.C_{osm} \cdot 10^3$
- Plus la concentration en solutés est importante
  - ⇒ plus la pression osmotique est élevée
  - ⇒ Plus le potentiel osmotique est faible
  - ⇒ Plus le potentiel hydrique est faible
  - ⇒ Plus l'eau entre dans la cellule
- cellules des plantes xérophytes ont pression osmotique plus grande que espèces mésophiles (accumulation de Pro très hydrophile dans leur vacuole)



Épiderme d'oignon rouge au MO dans l'eau distillé (faible potentiel hydrique dans milieu extérieur → entrée H<sub>2</sub>O dans cellule) dans l'eau concentrée en saccharose (très faible potentiel hydrique dans milieu extérieur → sortie H<sub>2</sub>O de la cellule)

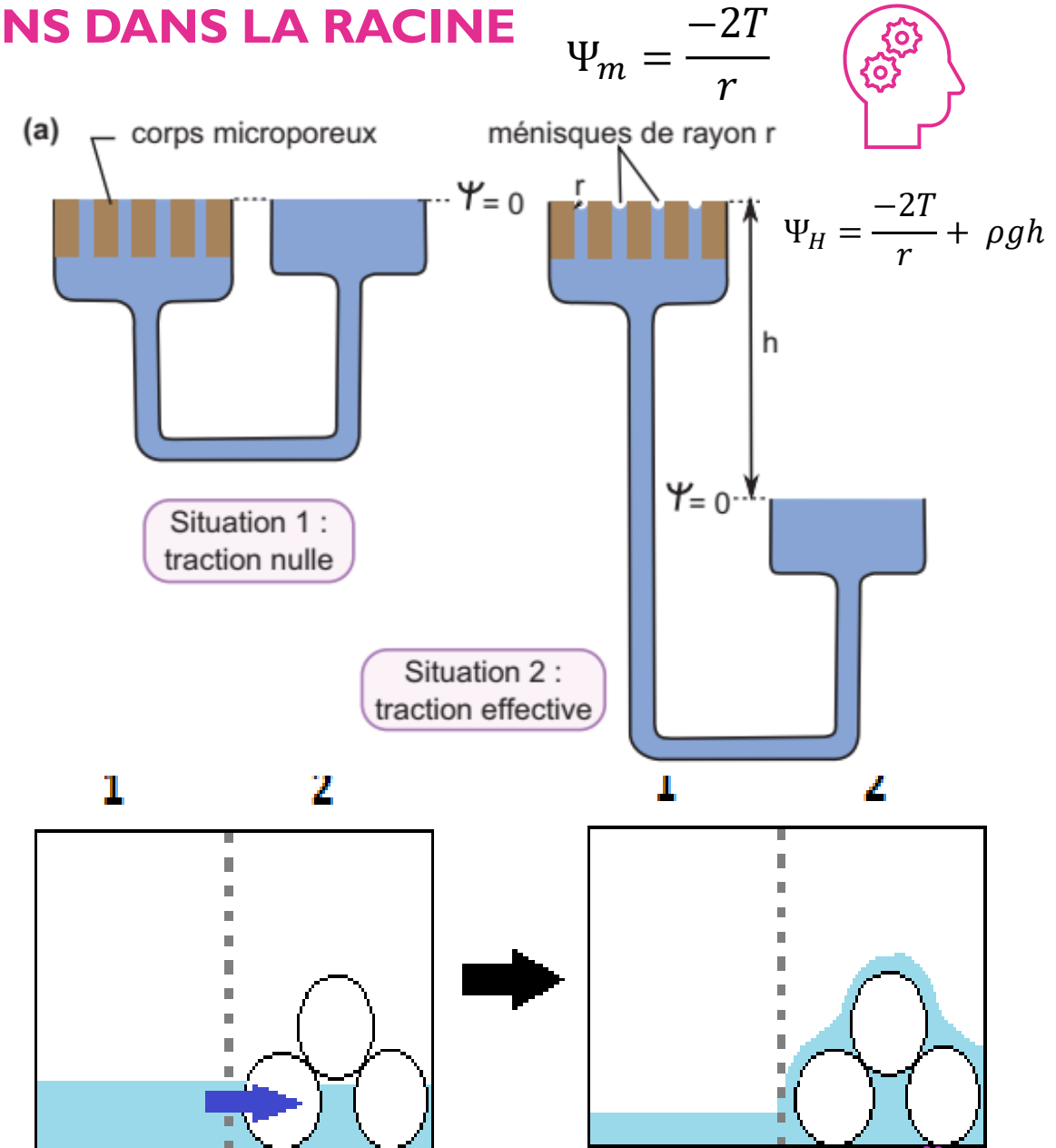


## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

$$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

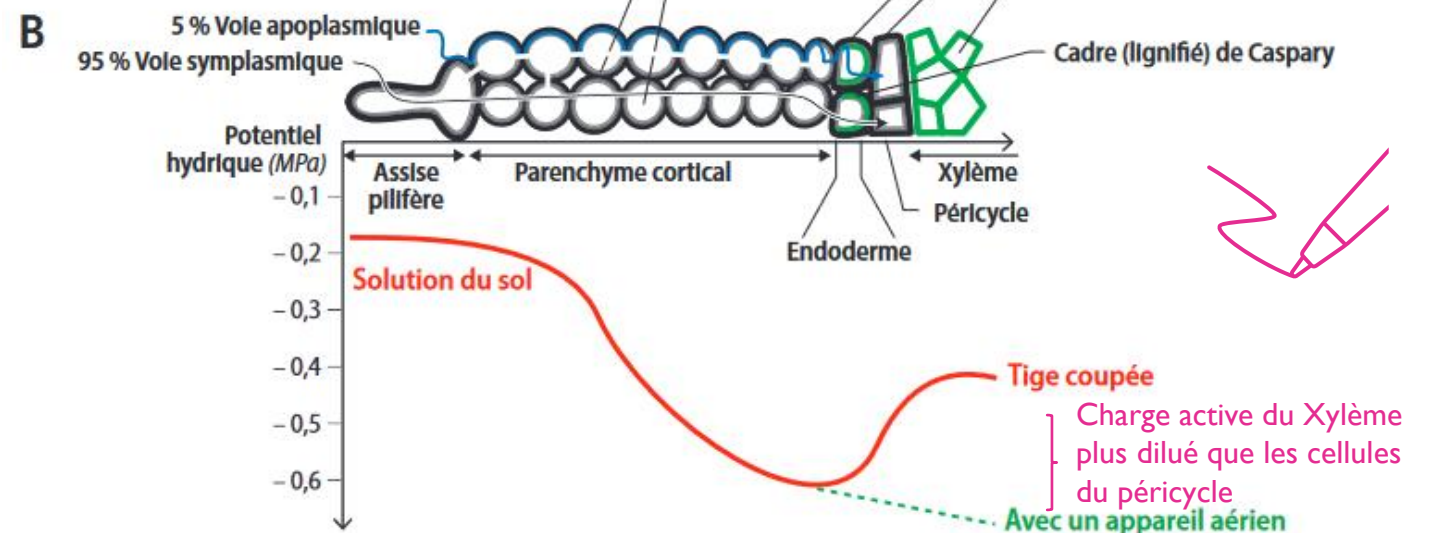
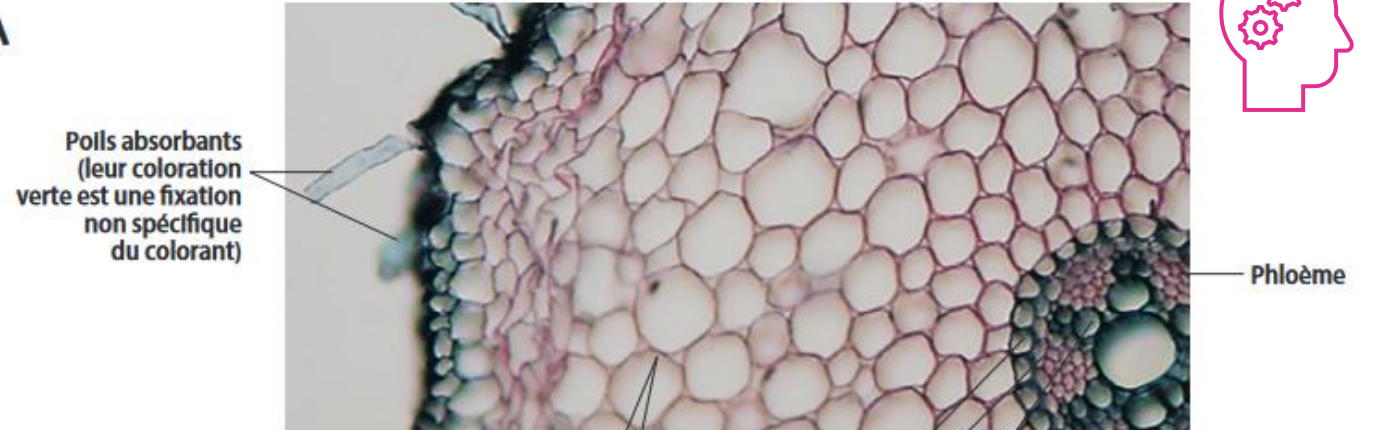
- **Potentiel matriciel** :  $\psi_m$  il correspond aux **forces de rétention** exercées par certains composés comme la matrice, semblable à une **force de capillarité**.
- Dans le sol, l'eau est retenue sur les surfaces hydrophiles par une composante matricielle :  $\psi_m$
- **L'eau est retenue (d'où le -)** par sa tension superficielle au niveau de ménisques de rayons R qui imbibent les surfaces hydrophiles.
  - **Plus le ménisque est de petit rayon plus l'eau est attirée vers les ménisques.**
- Cette composante matricielle = traction de la matrice (= force de ménisque) importante:
  - **entre les particules du sol** qui ont tendance à retenir l'eau et à empêcher l'absorption racinaire,
  - **entre les cellules du parenchyme lacuneux**, dans les très petits ménisques autour **des microfibrilles de cellulose** de leur paroi, où elle joue un rôle dans la traction de la sève brute



## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

- Au sein de la racine: **flux passif** de l'eau passe du sol vers le contenu intracellulaire
  - **potentiel osmotique** plus négatif que celui du sol (concentration plus élevée du cytosol en molécules et ions)
  - entrée d'eau : **diffusion facilitée (aquaporines) + diffusion simple**
  - Variation de **quantité d'aquaporines** : fonction du stress hydrique de la plante ⇒ adaptation aux variations de la quantité d'eau dans le sol

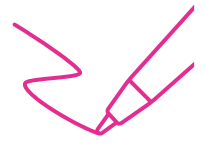
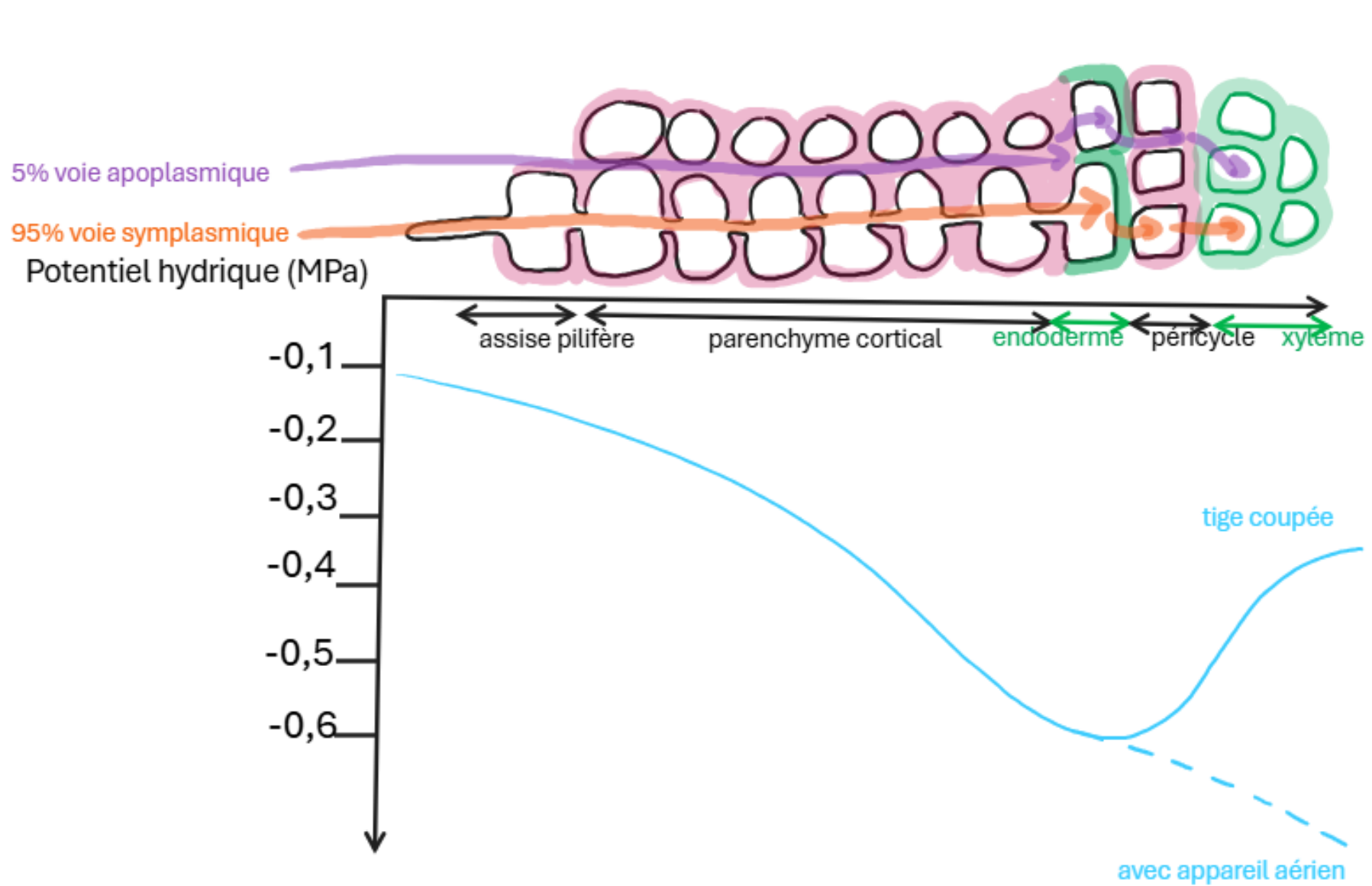


► **Figure 4.4.** L'eau passe dans la racine en suivant les potentiels hydriques décroissants.

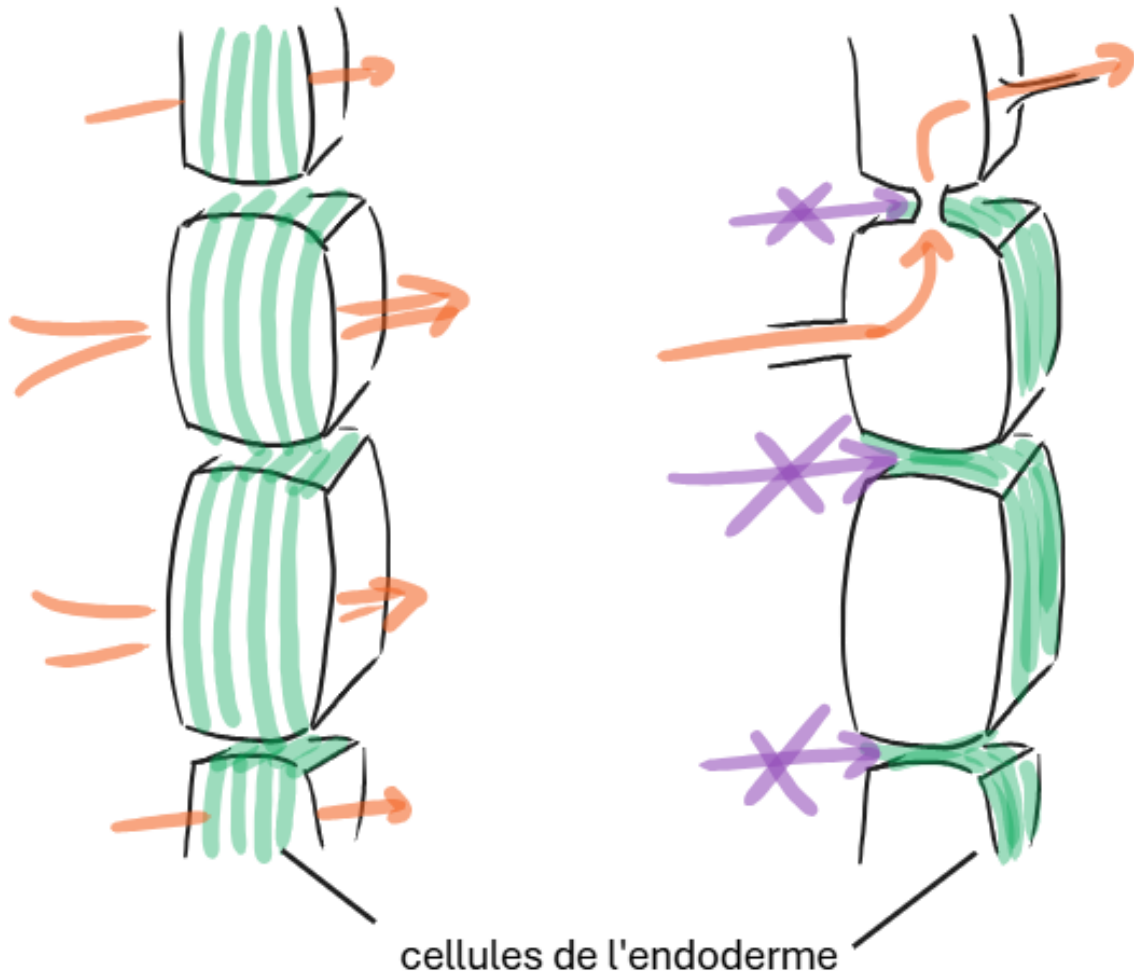
A. Une coupe transversale de racine d'iris colorée au carmine-vert (x 50).

B. L'évolution du potentiel hydrique dans les tissus racinaires.

Figure 14 : flux d'eau au travers d'une coupe transversale de racine (Vuibert, BCPST1, ed. 2021)



*Flux d'eau au travers d'une coupe transversale de racine*



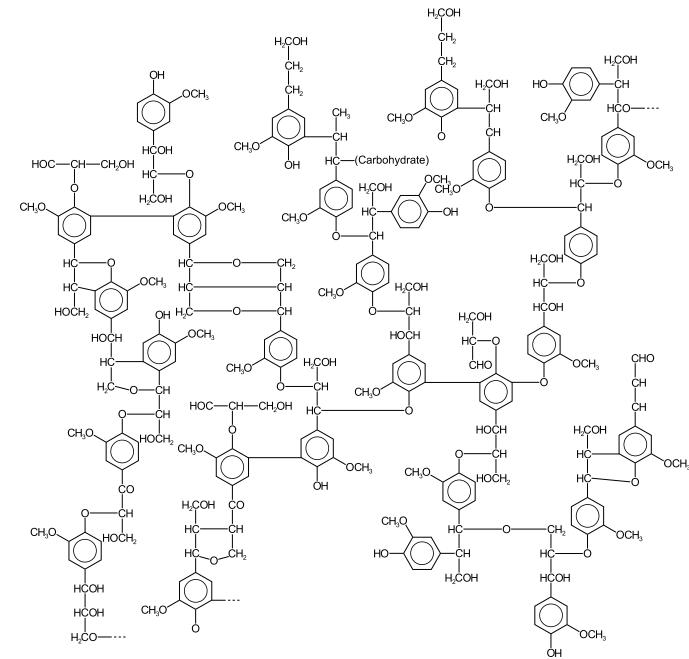
cellules de l'endoderme

lignification en U  
(Monocotylédones)

cadre de Caspary  
(Dicotylédones)

voie symplasmique

voie apoplasmique



Lignine = polyphénol, dérivé  
de phénylalanine très  
hydrophobe

Les deux types de lignification de l'endoderme: voie symplasmique obligatoire

## 2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'EAU



- **forte chaleur spécifique** = capacité thermique massique (quantité d'énergie à fournir pour élever de 1°C la température d'1g d'eau = 4,185 J/g = 1 calorie/g)
  - ⇒ **tampon thermique**
- **forte chaleur latente de vaporisation** (2 257 J/g = énergie à fournir pour vaporiser 1g d'eau à 100 °C et donc rompre toutes les liaisons H / par comparaison, 843 J/g pour l'éthanol) cf **thermolyse** 1<sup>ère</sup> ES
  - ⇒ thermorégulation : par sudation, par halètement, par évapotranspiration => l'animal ou le végétal se refroidit
- **force de cohésion interne**
  - tension superficielle (tension de surface eau/air) => montée de sève
  - force de capillarité => cohésion de la colonne d'eau => montée des sèves.
- **fluide** (quasi-)incompressible
  - ⇒ croissance cellulaire par plasmolyse et turgescence <sup>43</sup>
  - ⇒ Protection (liquide amniotique)



*Forte capacité thermique massique  
=> faible variation de T°C  
Fluide incompressible  
=> protection*



*Océan = réservoir thermique*



*chaleur latente de vaporisation à cause des liaisons H => L'évaporation de l'eau des surfaces des organismes retire une quantité importante de chaleur, ce qui explique la thermolyse réalisée par sudation ou halètement chez les animaux, évaporation au niveau des feuilles chez les végétaux ce qui évite leur surchauffe.*

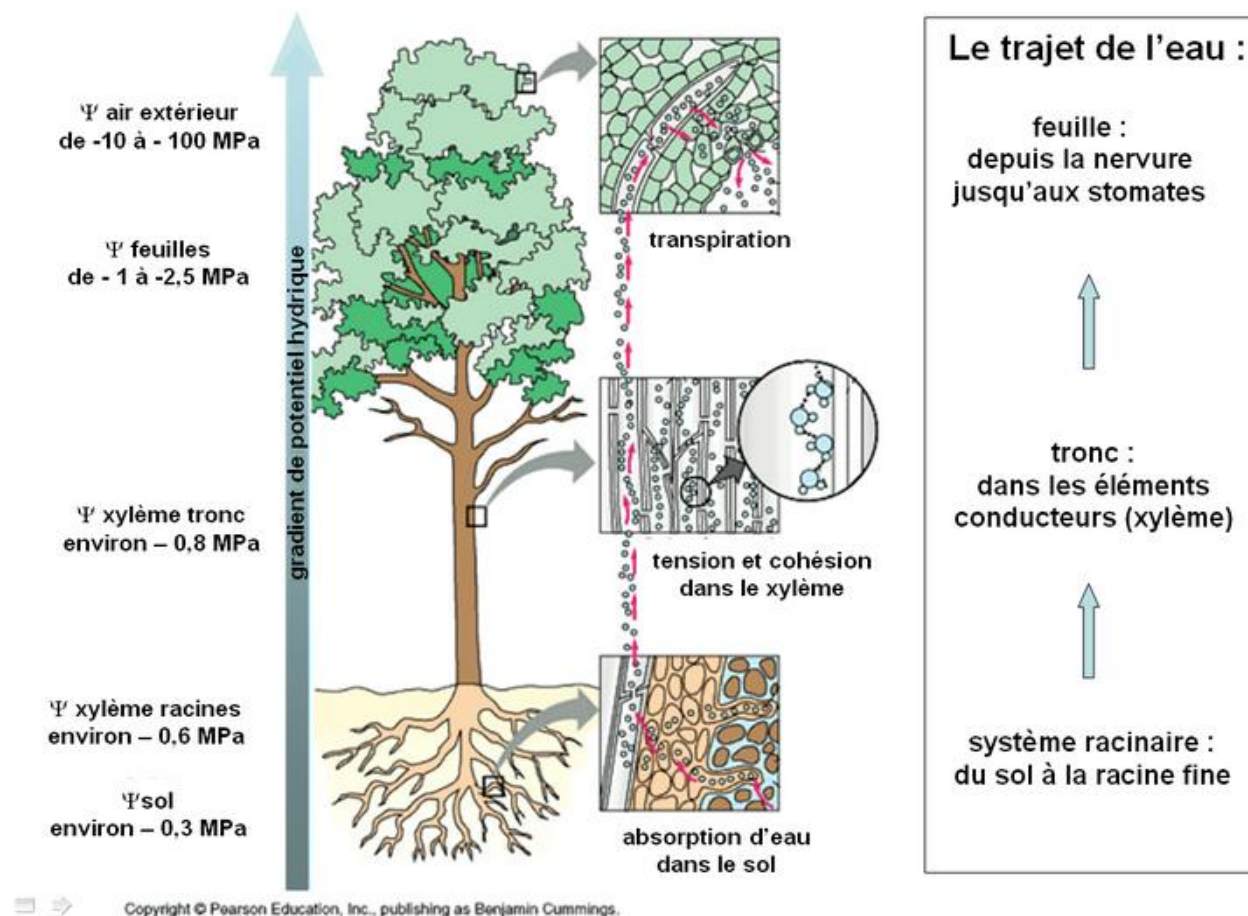


*Géris posé sur l'eau par des soies hydrophobes*



# CIRCULATION DE L'EAU AU SEIN D'UNE PLANTE

- Théorie de la tension-cohésion (Dixon 1896):
  - Montée de sève brute grâce à transpiration foliaire
  - Moteur de l'ascension: potentiel hydrique (toujours négatif -> eau sous tension et non sous pression)
- Cavitation: formation de bulles de vapeur d'eau souvent par action mécanique (ex: aspirer trop vite dans une paille)
  - => cavitation souvent provoquée par la sécheresse
  - => cavitation fréquente chez plantes xérophytes
- Chez les conifères les ponctuations entre 2 vaisseaux de xylème forment une soupape de sécurité



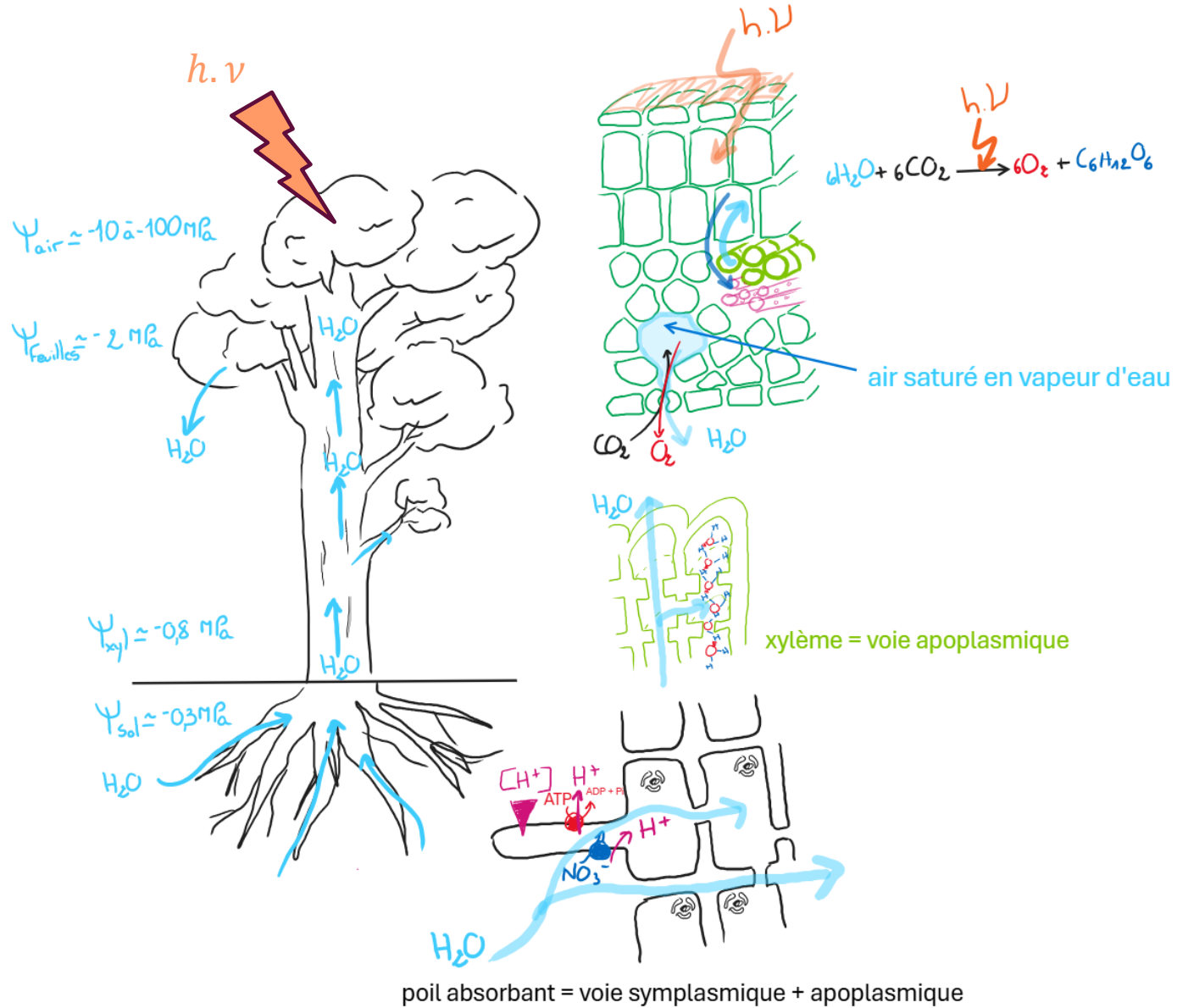


Schéma bilan: l'eau dans un arbre (S. Dalaine)

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### I. Potentiel hydrique et flux hydrique

- Liaisons H entre H<sub>2</sub>O
  - ⇒ Cohésion des molécules d'eau = continuum
  - ⇒ Continuum des racines aux feuilles
  - ⇒ Flux hydrique selon les potentiels hydriques décroissants

**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 ( $\psi$ ). Dans le cas du courant de masse sur longue distance, le gradient de  $\psi$  est principalement dû au gradient de potentiel de pression ( $\psi_p$ ). La transpiration provoque une diminution du  $\psi_p$  de l'extrémité du xylème qui se trouve dans la feuille. Ce  $\psi_p$  est alors inférieur au  $\psi_p$  de l'extrémité située dans la racine.

**Valeurs à connaître >>**

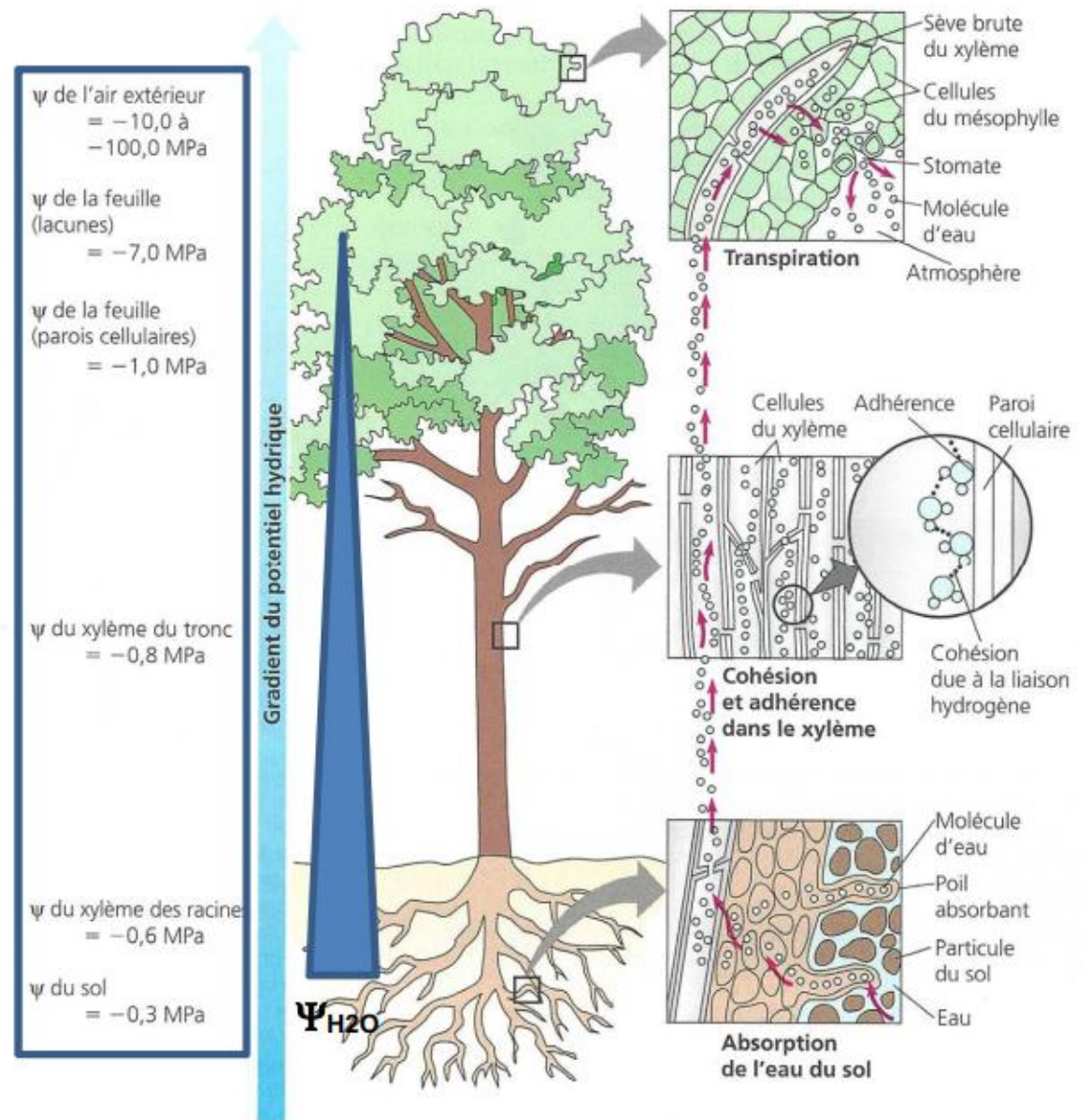


Figure 15 : schéma du flux hydrique au travers de l'arbre

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

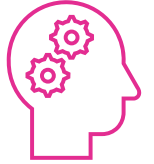
- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions mise en évidence expérimentale



Protocole + résultats	interprétation
<p>Des plantes sont cultivées hors sol, leurs racines immergées dans solution nutritive aérée.</p> <p>On observe une diminution de <math>[K^+]</math>, <math>[NO_3^-]</math> et une acidification de la solution nutritive.</p>	<p>Les plantes prélèvent <math>K^+</math>, <math>NO_3^-</math>, elles rejettent <math>H^+</math>.</p>
<p>Si l'humidité ambiante <math>\nearrow</math> (donc si la transpiration foliaire <math>\searrow</math>), on n'observe aucune perturbation de l'absorption des ions</p>	<p>Le moteur de l'absorption des ions n'est pas la transpiration foliaire.</p>
<p>L'inhibition de la synthèse d'ATP provoque une inhibition de l'absorption des ions</p>	<p>l'absorption d'ions est un phénomène actif nécessitant de l'énergie directement ou indirectement.</p>

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions

#### Une expulsion active de $H^+$ par des pompes ATPasiques



	pH	E (mV)	[K <sup>+</sup> ] (mM)	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mM)
Milieu extérieur	6	0	1	2
Milieu intérieur	7,5	-110	75	30

À 20°C

$$\Delta G'_{H^+ (i \rightarrow e)} = RT \ln (10^{-6}/10^{-7,5}) + zF (+110 \cdot 10^{-3}) = 8,31 * 293 * \ln (31,62) + 1 * 96 500 (+0,110) = 8409 + 10615 = +19 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

- La sortie d' $H^+$  est endergonique → Phénomène actif
- Expulsion active de protons grâce aux pompes à  $H^+$  ATPasiques
- Pompes  $H^+$  ATP dép sur la membrane de toutes les cellules végétales, du cortex et du rhizoderme
  - ⇒ potentiel de repos = -110mV (50% pompe électrogénique 50% diffusion d'ions).
  - ⇒ gradient de pH entre apoplasme (pH 6 : paroi compartiment acide) et symplasme (pH 7,5).

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions

#### Un transport passif du $K^+$



	pH	E (mV)	[K <sup>+</sup> ] (mM)	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mM)
Milieu extérieur	6	0	1	2
Milieu intérieur	7,5	-110	75	30

À 20°C

$$\Delta G'_{K^+(e \rightarrow i)} = RT \ln(75) + zF(-110 \cdot 10^{-3}) = -0,1 \text{ kJ.mol}^{-1} < 0$$

- **entrée de  $K^+$  exergonique**

- ⇒ potentiel électrique « l'emporte » sur le potentiel chimique de  $K^+$

- **composante électrique (mise en place par pompe  $H^+$ ) ⇒ force électrique à l'origine de l'entrée de  $K^+$  contre son gradient chimique**

- ⇒ Entrée « passive » dans les cellules végétales par diffusion via des canaux membranaires insaturables dans les conditions cellulaires ( $10^6$  ions/sec).

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions

#### Une entrée de $\text{NO}_3^-$ par transport actif II (symport avec $\text{H}^+$ )



	pH	E (mV)	[K <sup>+</sup> ] (mM)	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (mM)
Milieu extérieur	6	0	1	2
Milieu intérieur	7,5	-110	75	30

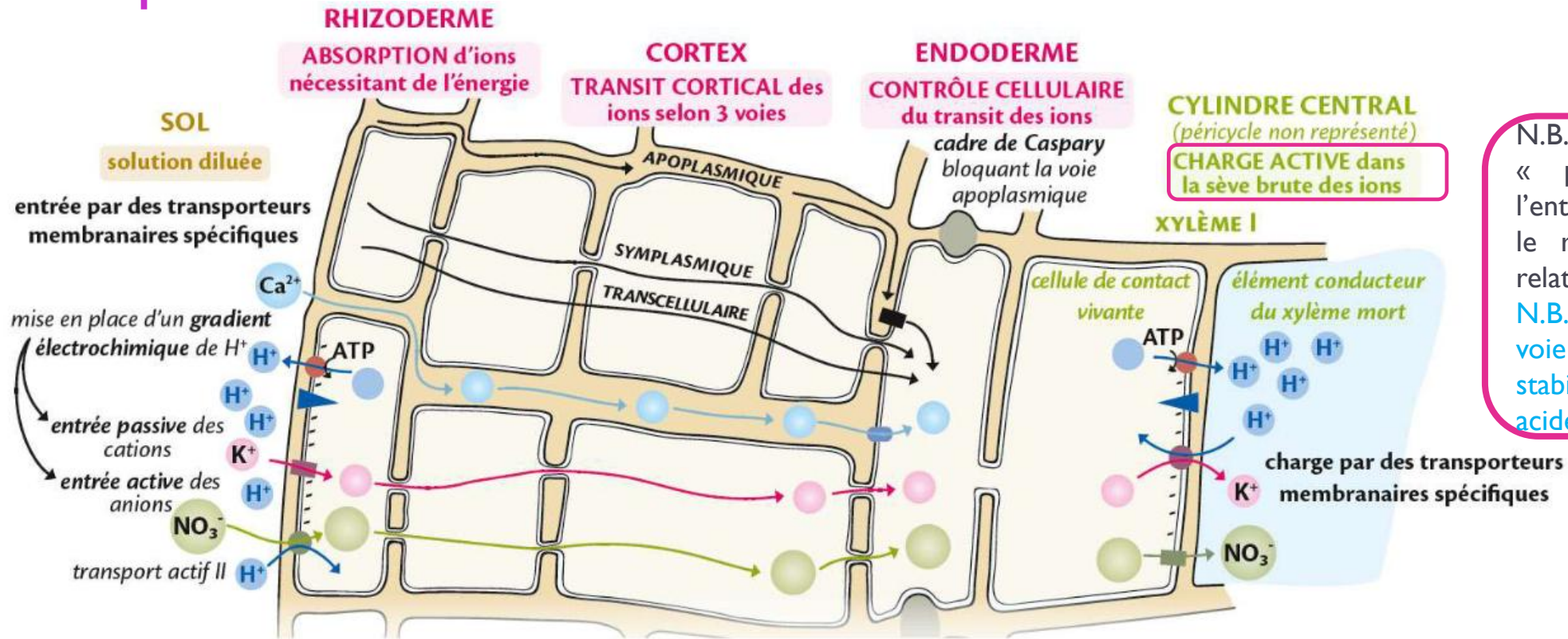
À 20°C

$$\Delta G'_{\text{NO}_3^- (e \rightarrow i)} = RT \ln 15 + (-1) \mathcal{F}(-0,11) = +17 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} > 0$$

- entrée des nitrates endergonique à la fois par composante chimique et électrique.
- $\text{NO}_3^-$  : transport actif II grâce à une protéine porteuse à double spécificité réalisant un symport  $\text{H}^+/\text{NO}_3^-$
- ion  $\text{H}^+$  = ion moteur
- entrée  $\text{H}^+$  exergonique  $\Rightarrow$  entrée de  $\text{NO}_3^-$  endergonique = couplage par symport
  - $\Rightarrow$  **Transport actif secondaire des  $\text{NO}_3^-$**
- Des protéines porteuses du même type permettent l'entrée dans la racine des phosphates et des sulfates ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), ce sont des protéines qui changent de conformation, leur **cinétique est hyperbolique**, elles transloquent  $10^3$  ions/sec.

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions



N.B. le qualificatif « passif » donné à l'entrée des cations dans le rhizoderme est très relatif.

N.B. le  $\text{Ca}^{2+}$  emprunte la voie apoplasmique via la stabilisation par la pectine acide

Figure 16 : les 2 voies de passage des ions et de l'eau du cortex vers le cylindre central (+ voie transcellulaire)(Aurélie Denis)

Dans le cortex, le transport d'eau ou d'ions par 2 voies :

- **voie symplasmique** (par le symplasma = ensemble des cytosols) : en passant de cellule en cellule par les plasmodesmes (**95% du flux d'eau**)
- **voie apoplasmique** (par l'apoplasme = ensemble des parois) : en passant à l'extérieur des cellules (paroi) ou dans les cellules mortes
  - Négligeable car forte résistance
  - Importante lors d'une forte transpiration foliaire
  - Impossible au niveau de l'endoderme

# B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

## 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions

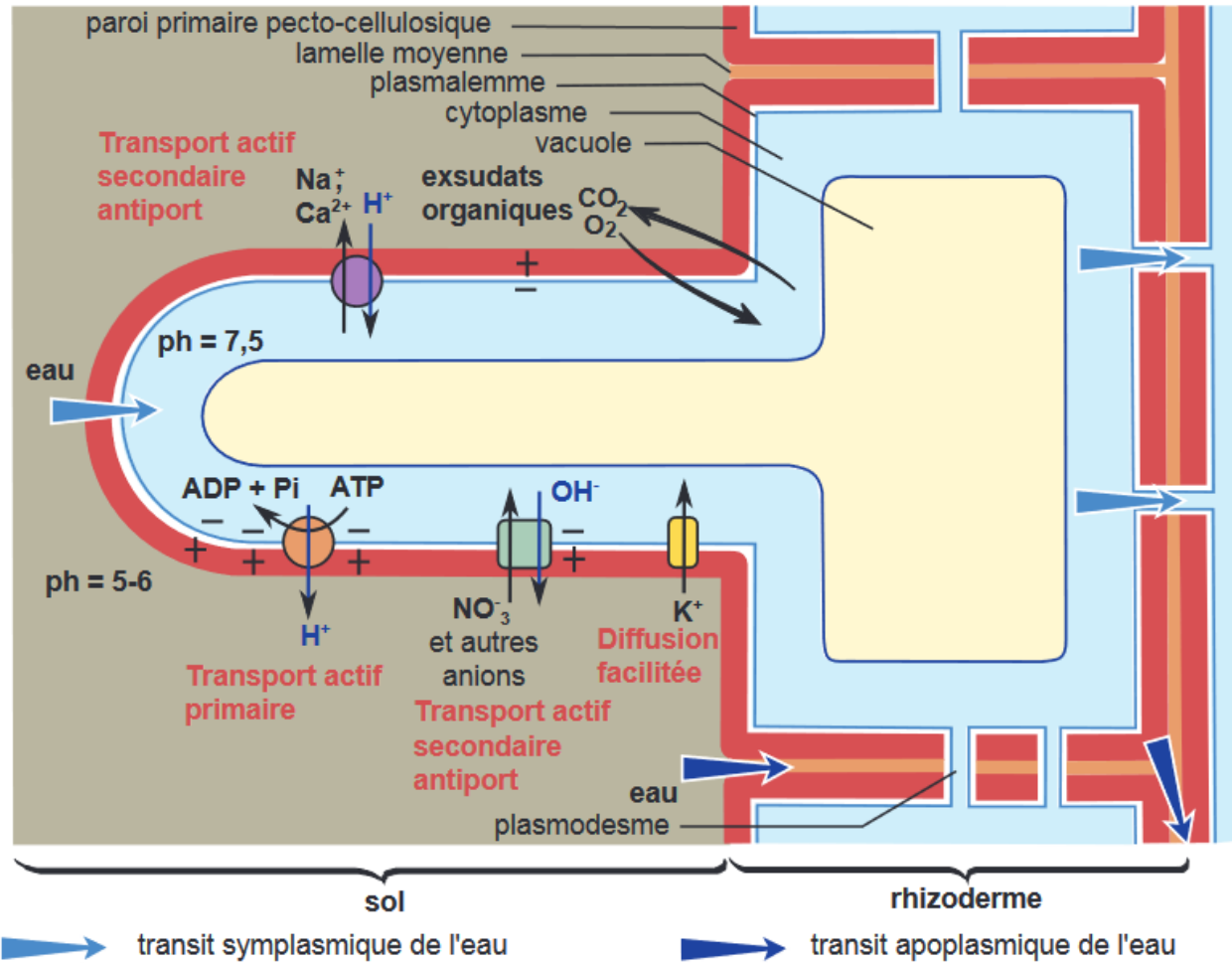


Figure 17 : force proton-motrice et absorption des ions minéraux au niveau du rhizoderme (Dunod, J'intègre, ed. 2021)

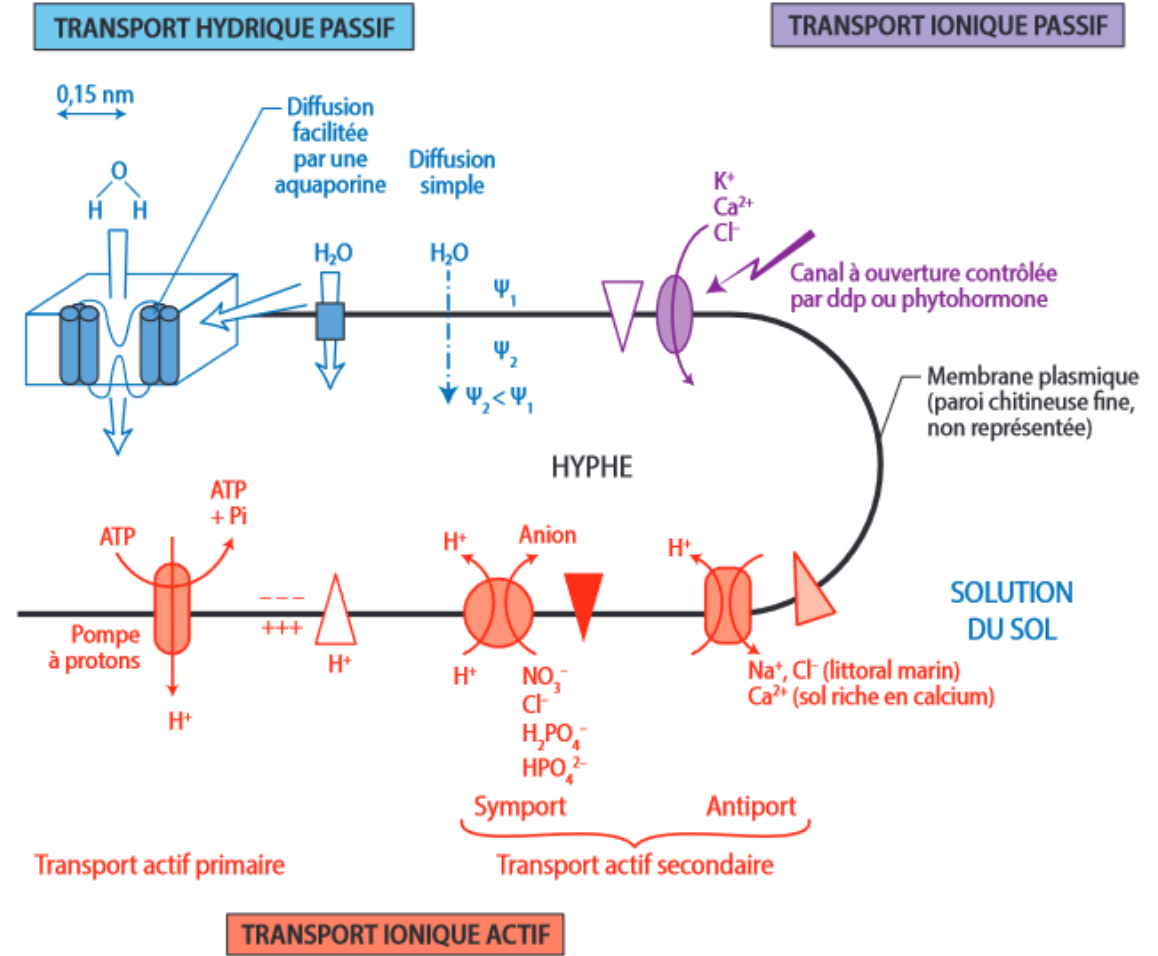


Figure 18 : les modalités d'absorption par un hyphe d'une mycorhize de la solution du sol (Vuibert, BCPST1, ed. 2021)

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

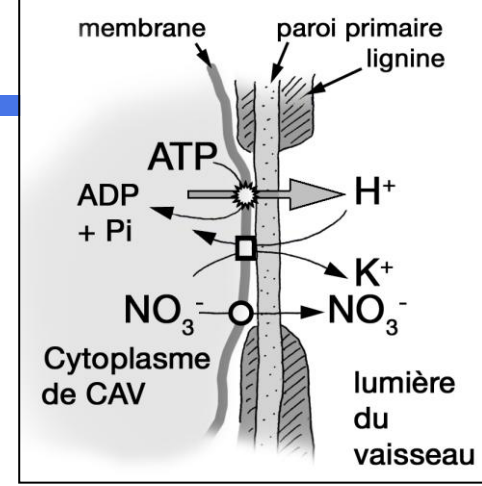
### 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

- potentiel hydrique ( $\psi_H$ ) de l'épiderme vers cylindre central



⇒ flux d'eau de la périphérie vers le centre passif

- Deux voies de la solution hydrominérale issue de l'absorption :
  - Voie symplasmique (95% de la solution transitant) → rôle des plasmodesmes.
  - Voie apoplasmique (minoritaire, tout dépend des tissus) : → imbibition des parois pectocellulosiques



Charge de la sève brute dans le xylème

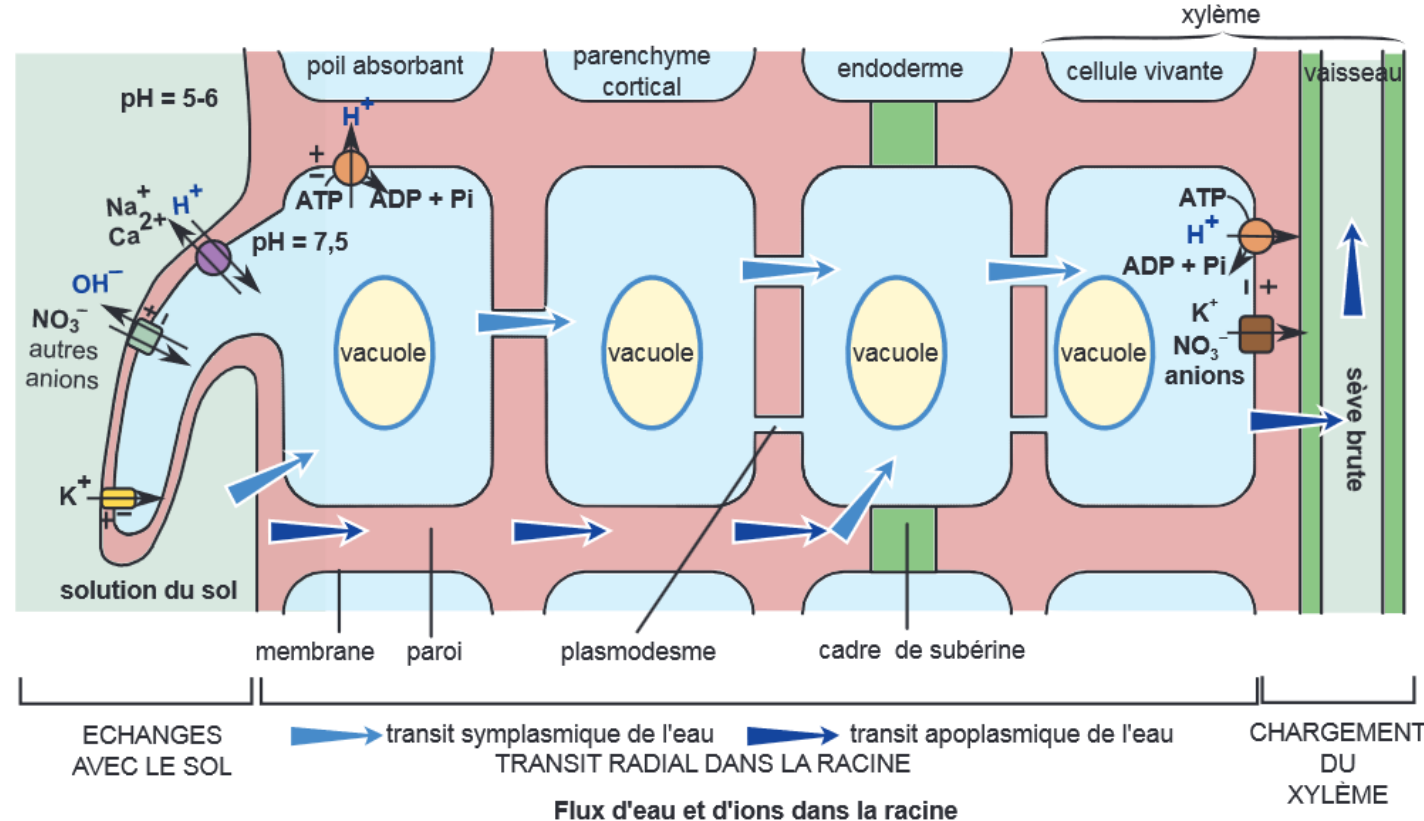


Figure 19 : de la solution du sol à la sève brute (Dunod, j'intègre, ed. 2021))

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

- Rôle de l'endoderme, cylindre creux entourant les vaisseaux (cortex racinaire):
  - parois lignifiées (cadre de Caspary chez les eudicotylédones, épaissement de la paroi en U chez les monocotylédones)
    - ⇒ voie symplasmique obligatoire
    - ⇒ contrôle des échanges entre la périphérie de la racine et le cylindre central franchissement d'une membrane plasmique.
    - ⇒ A l'issue de ces processus, la solution absorbée par les racines se retrouve dans les vaisseaux du xylème au sein du cylindre central



Charge de la sève brute dans le xylème

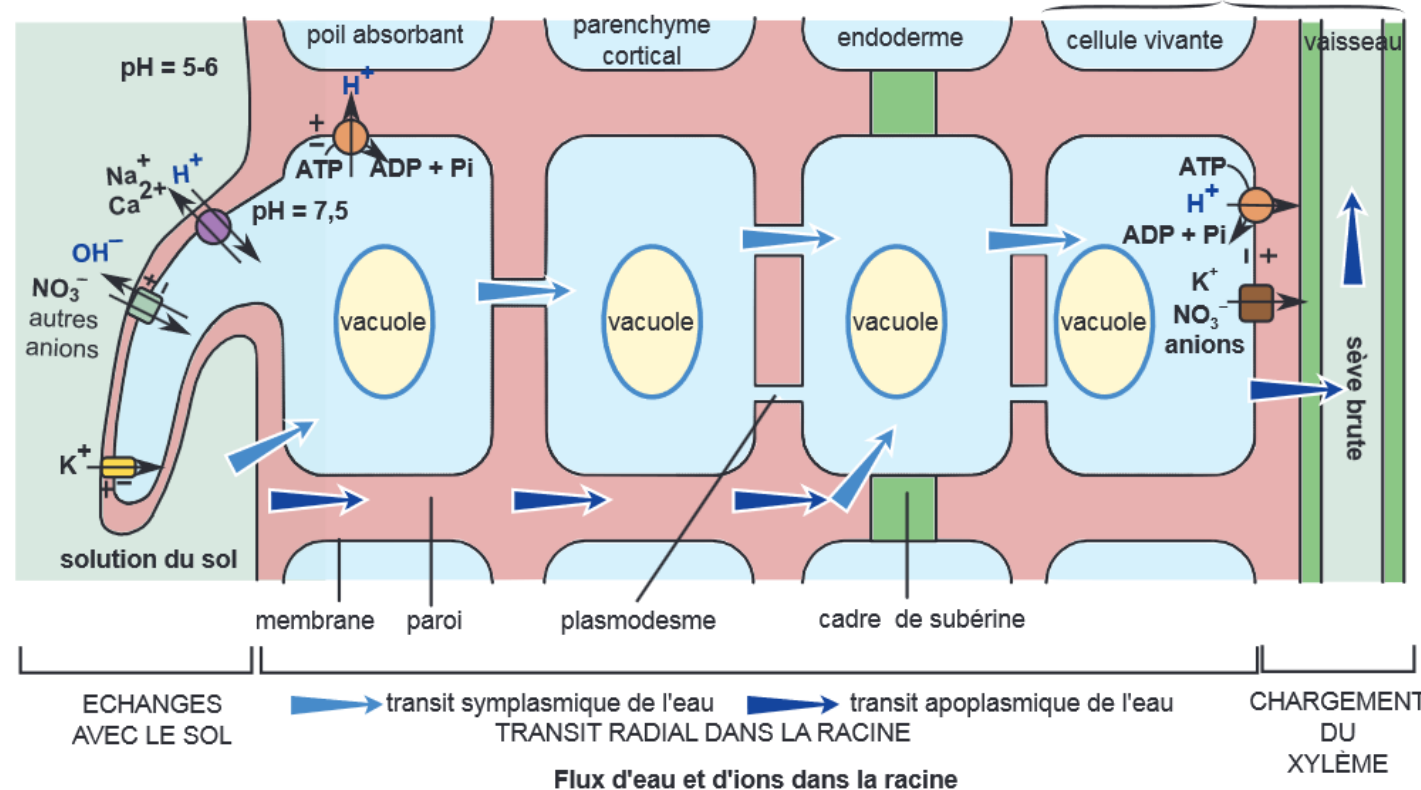
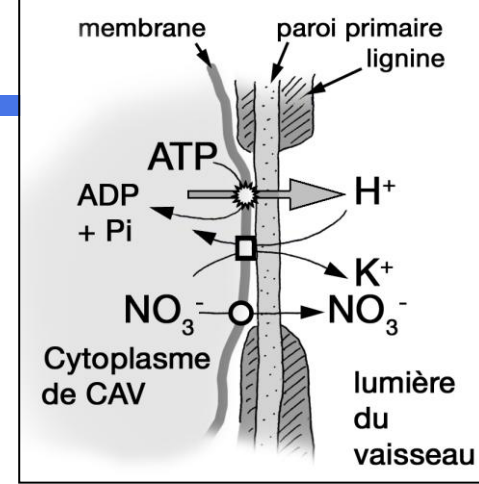


Figure 19 : de la solution du sol à la sève brute (Dunod, j'intègre, ed. 2021))

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

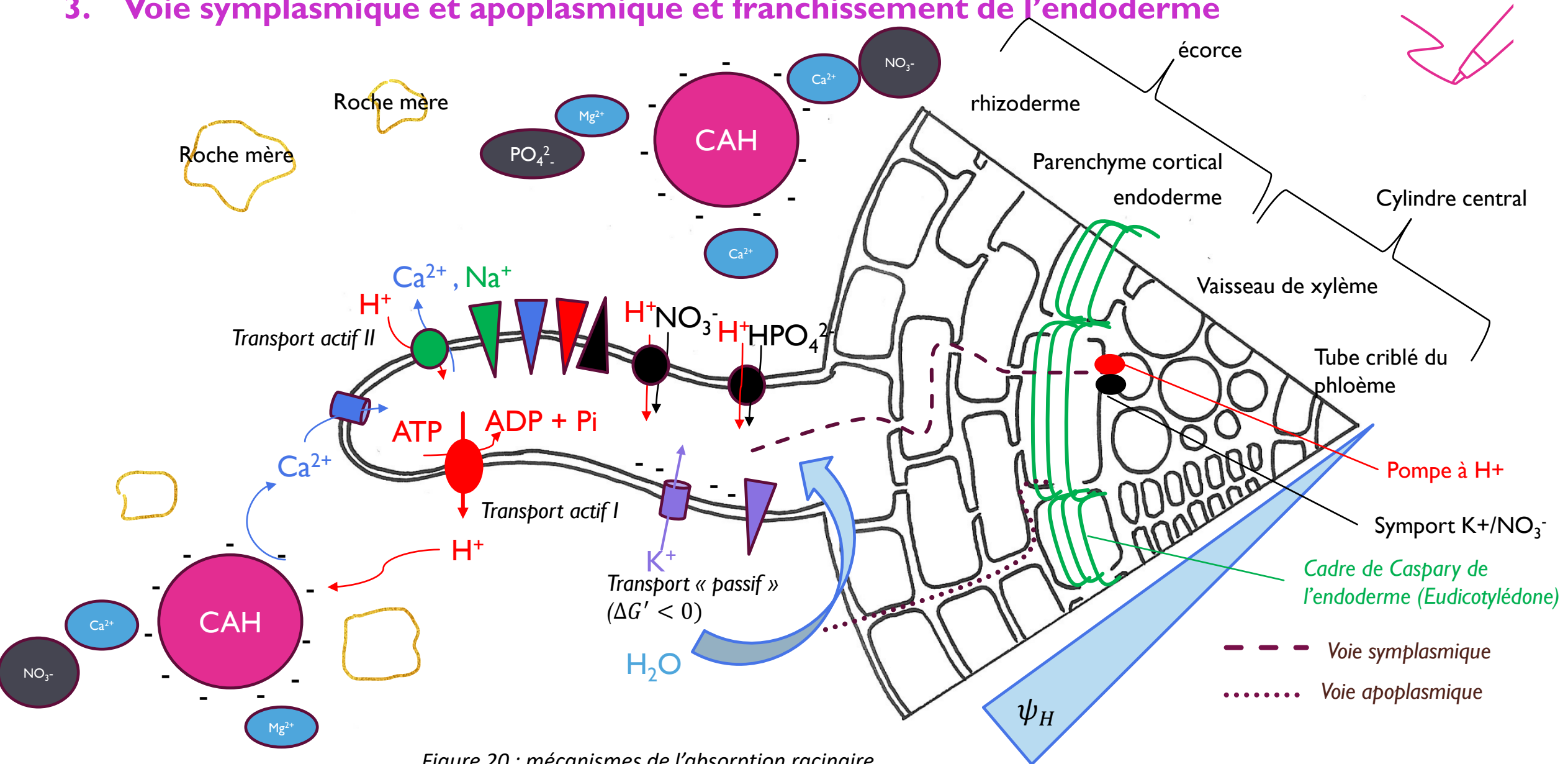


Figure 20 : mécanismes de l'absorption racinaire

## B. MODALITES D'ENTREE DE L'EAU ET DES IONS DANS LA RACINE

### 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

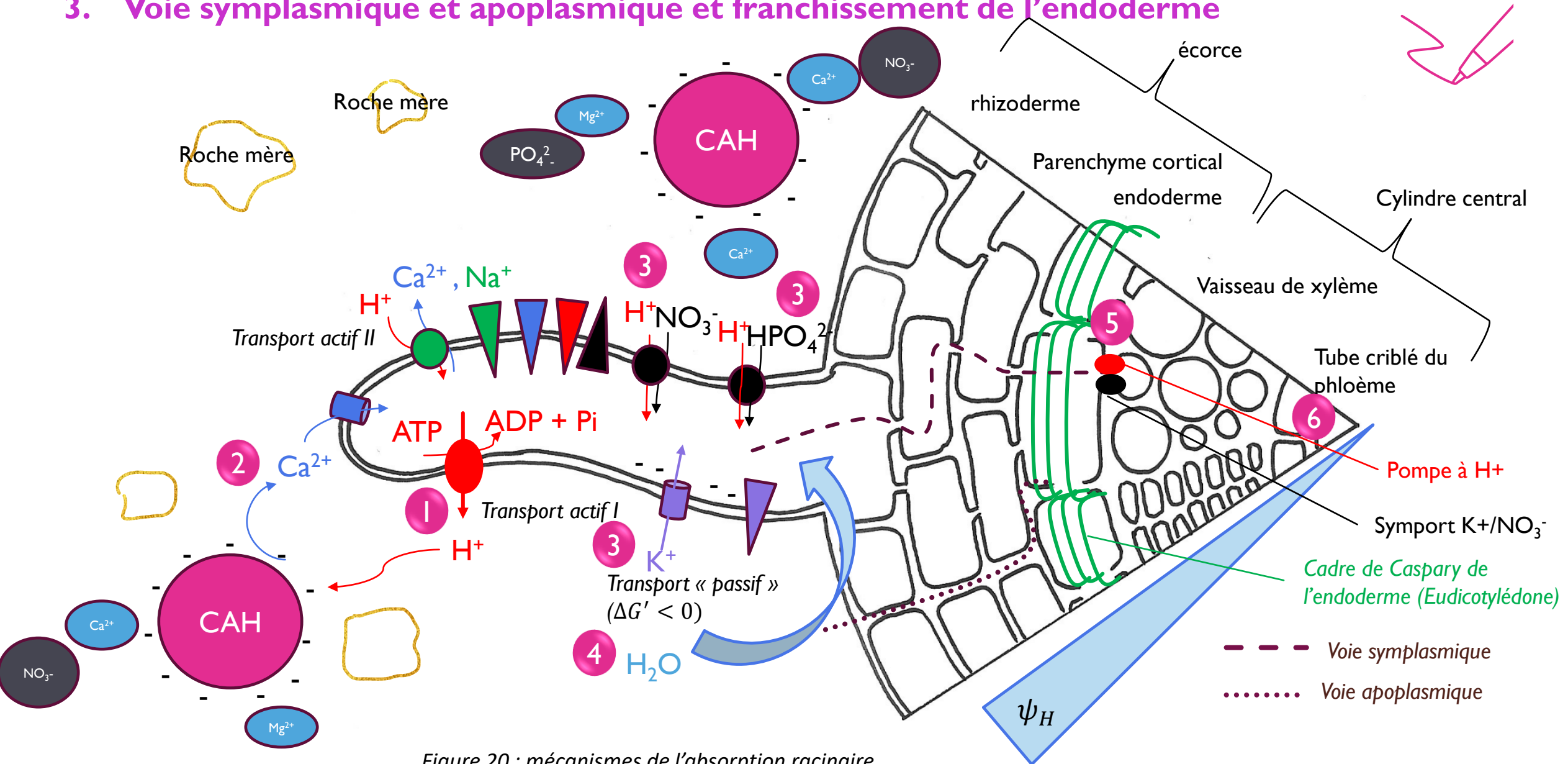


Figure 20 : mécanismes de l'absorption racinaire

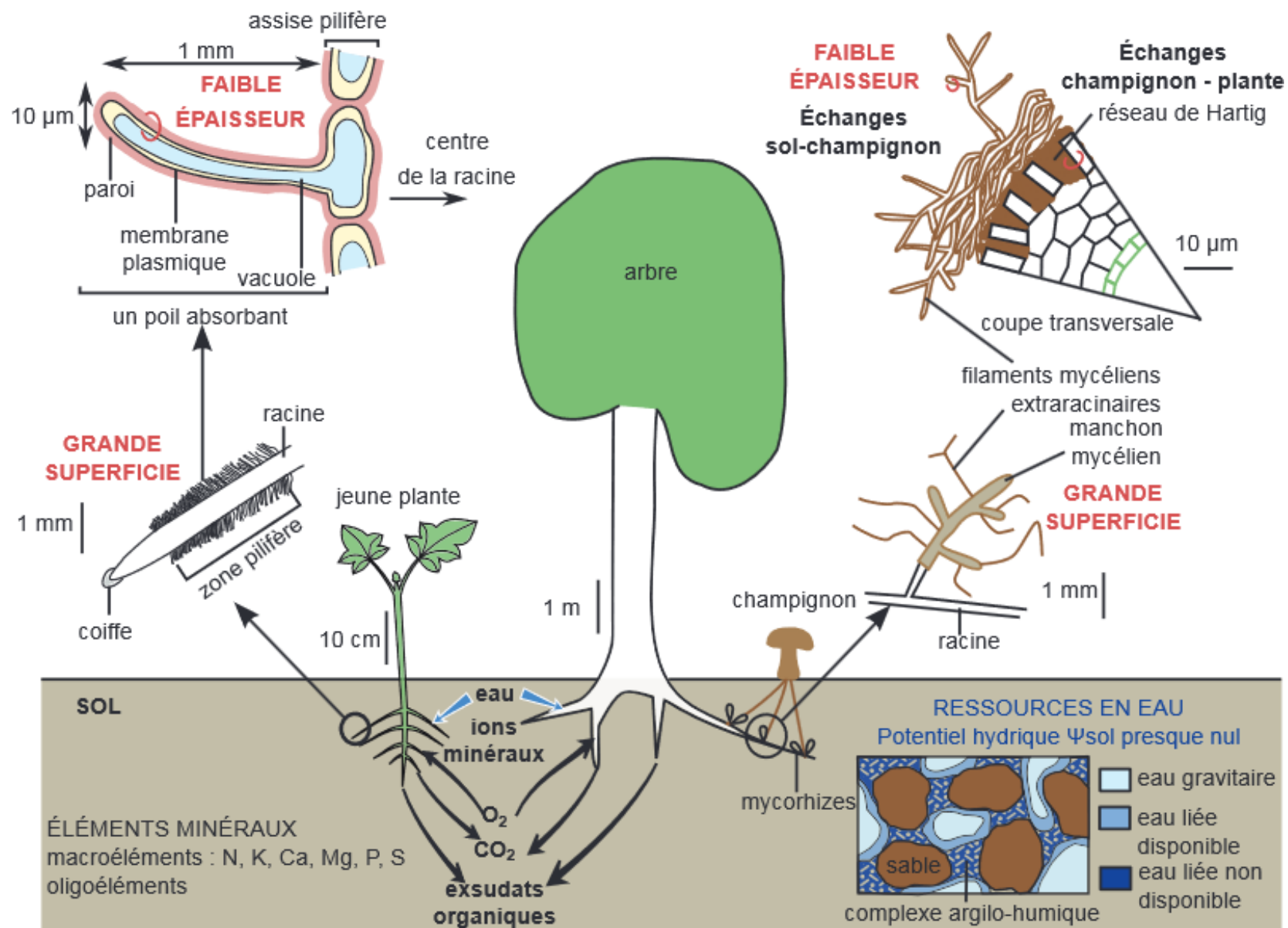


Figure 4.1 Les surfaces d'échange avec le sol.

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME



## I. Composition de la sève brute

- Sève brute = solution acide (pH ~6) diluée, qui contient :
  - **99% eau**
  - moins de 1g/L de substances dissoutes :
    - surtout des ions minéraux : anions (nitrates, phosphates, sulfates) et cations ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  ...)
    - de rares biomolécules : aa formés en partie dans la racine (pour les Fabacées grâce au  $NH_4^+$  fourni par Rhizobium), sucres (surtout en fin hiver chez les arbres ex : sirop d'érable), hormones végétales



Sirop d'érable  
récolté en début de printemps



Jus de bouleau récolté en début  
de printemps

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

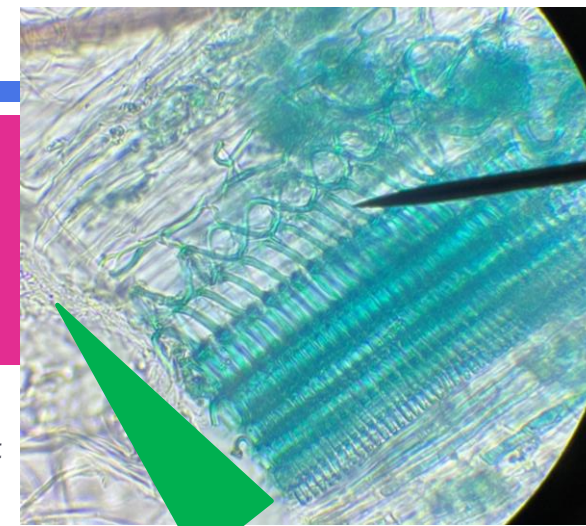
# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

## 2. Structure du Xylème



### 2.1. Les éléments conducteurs : trachéides et vaisseaux

- **xylème = tissu conducteur** avec **plusieurs types cellulaires**
  - **conduction de la sève brute**
  - **xylème primaire** (toutes les Angiospermes)
  - **xylème secondaire** (uniquement chez les Dicotylédones arborescentes)
- Dans le **xylème I** :
  - protoxylème = **trachéides** annelées et spiralées (dépôts de **lignine** dans paroi)
  - métaxylème = **vaisseaux** rayés, réticulés et ponctués 10 fois plus larges (~100 µm).
- Dans le **xylème II** :
  - **Vaisseaux de Xylème toujours ponctués**
  - des **fibres de soutien** = cellules vivantes à paroi pectocellulosique (rose)
  - des **cellules associées aux vaisseaux** (CAV = cellules de contact) intervenant dans le chargement des sèves
  - des **cellules parenchymateuses contenant des réserves**
- ascension de la sève brute contre la gravité grâce à **poussée racinaire** (minoritaire) et **évapotranspiration foliaire** (majoritaire).



MO coloration Carmino-vert  
de Mirande promo 2025

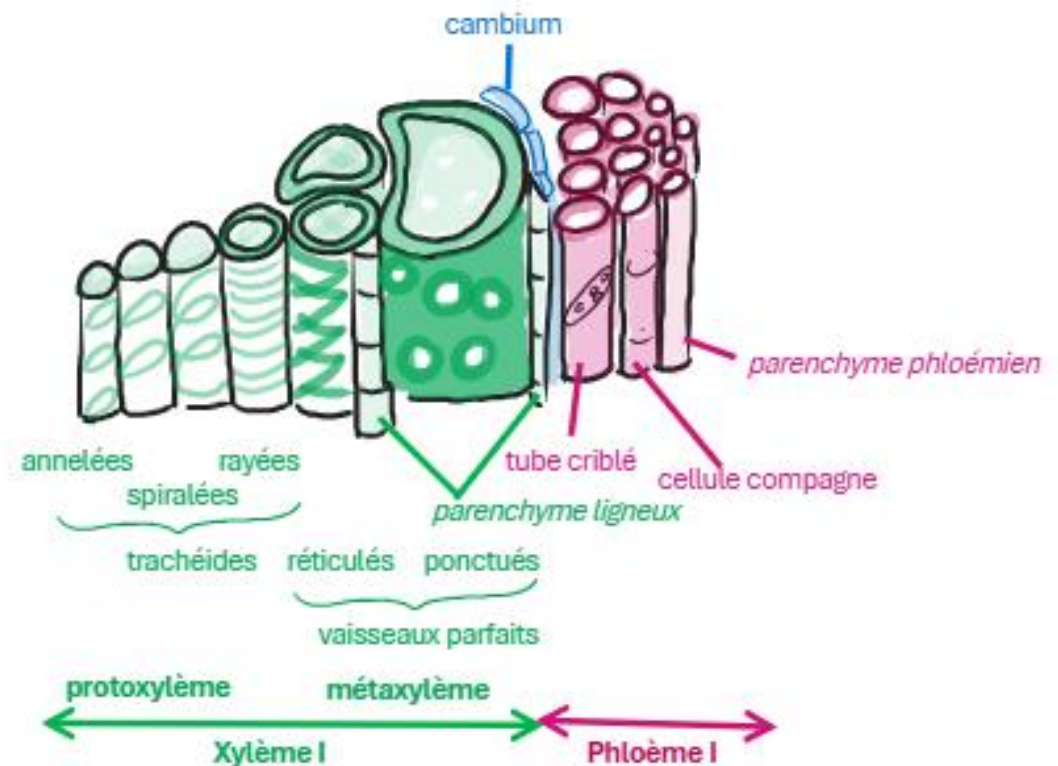
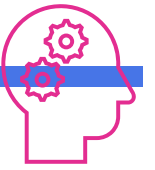


Figure 21 : bloc diagramme de l'organisation d'un FCV

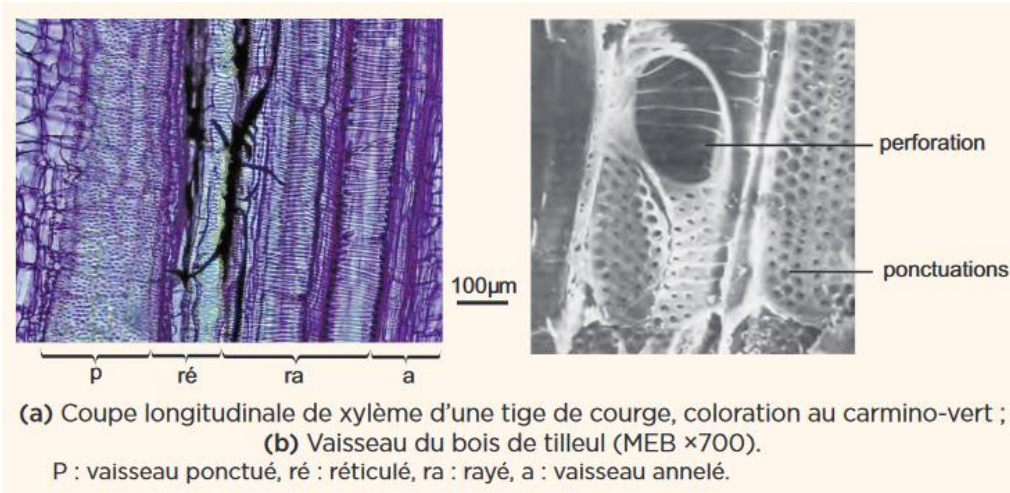
# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME



## 2. Structure du Xylème

### 2.1. Les éléments conducteurs : trachéides et vaisseaux

- ▶ Différenciation centripète dans les racines
- ▶ Différenciation centrifuge dans les tiges

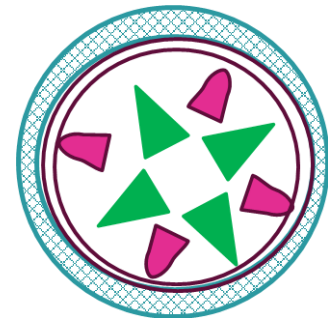


**Les tissus conducteurs**

Il s'agit des vaisseaux de xylème, à paroi lignifiée donc constitués de cellules mortes et des tubes criblés du phloème, cellules anucléées mais non mortes.  
 Présents dans le cylindre central:

- de la racine: en position **alterne**, xylème à différenciation centripète
- de la tige: en **superposition**, xylème à différenciation centrifuge
- de la feuille: en **superposition**, souvent associés au sclérenchyme (rôle de soutien)

CT de tige de maïs après double coloration  
 Images : Michèle Crèvecoeur université de Liège



Cellules mortes à paroi lignifiée

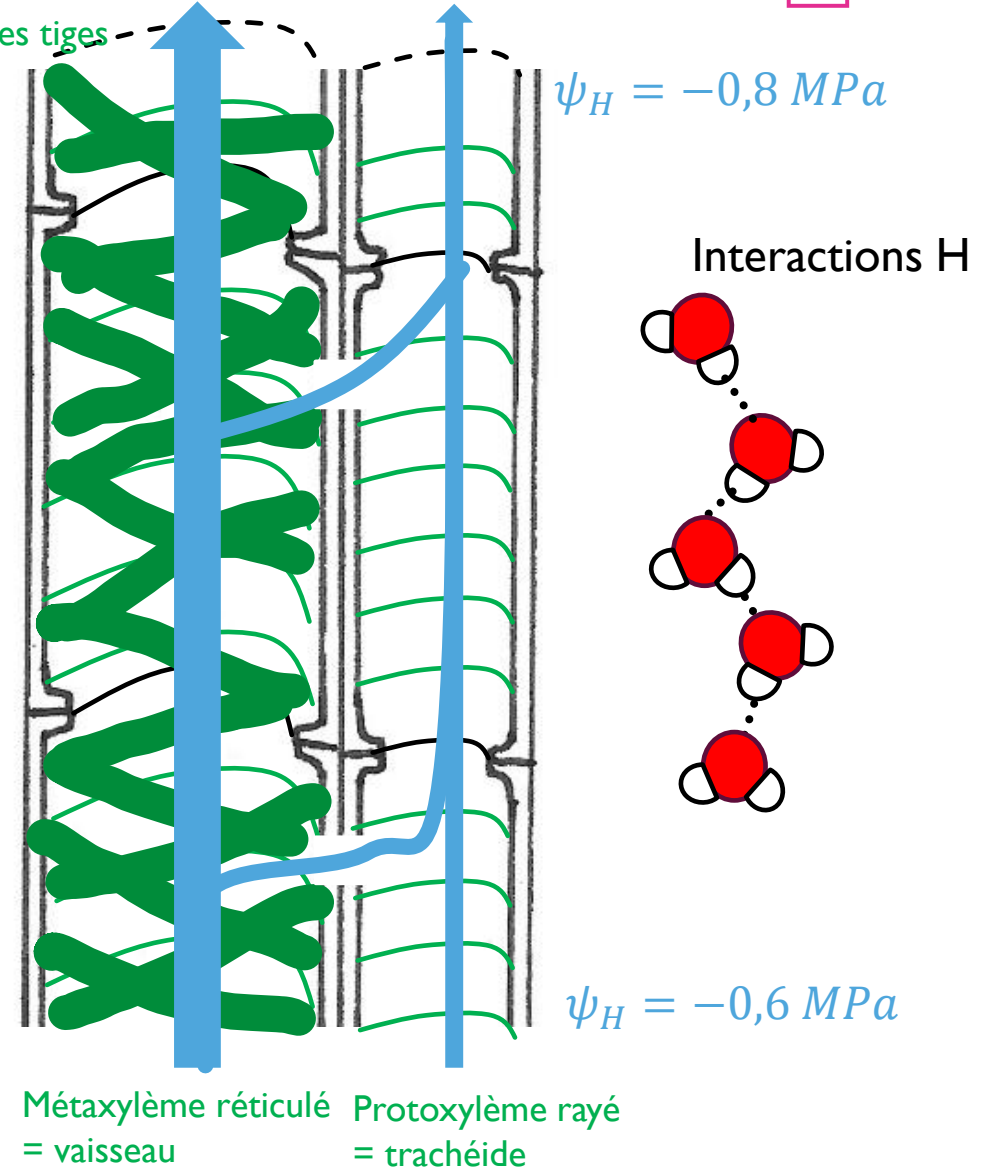
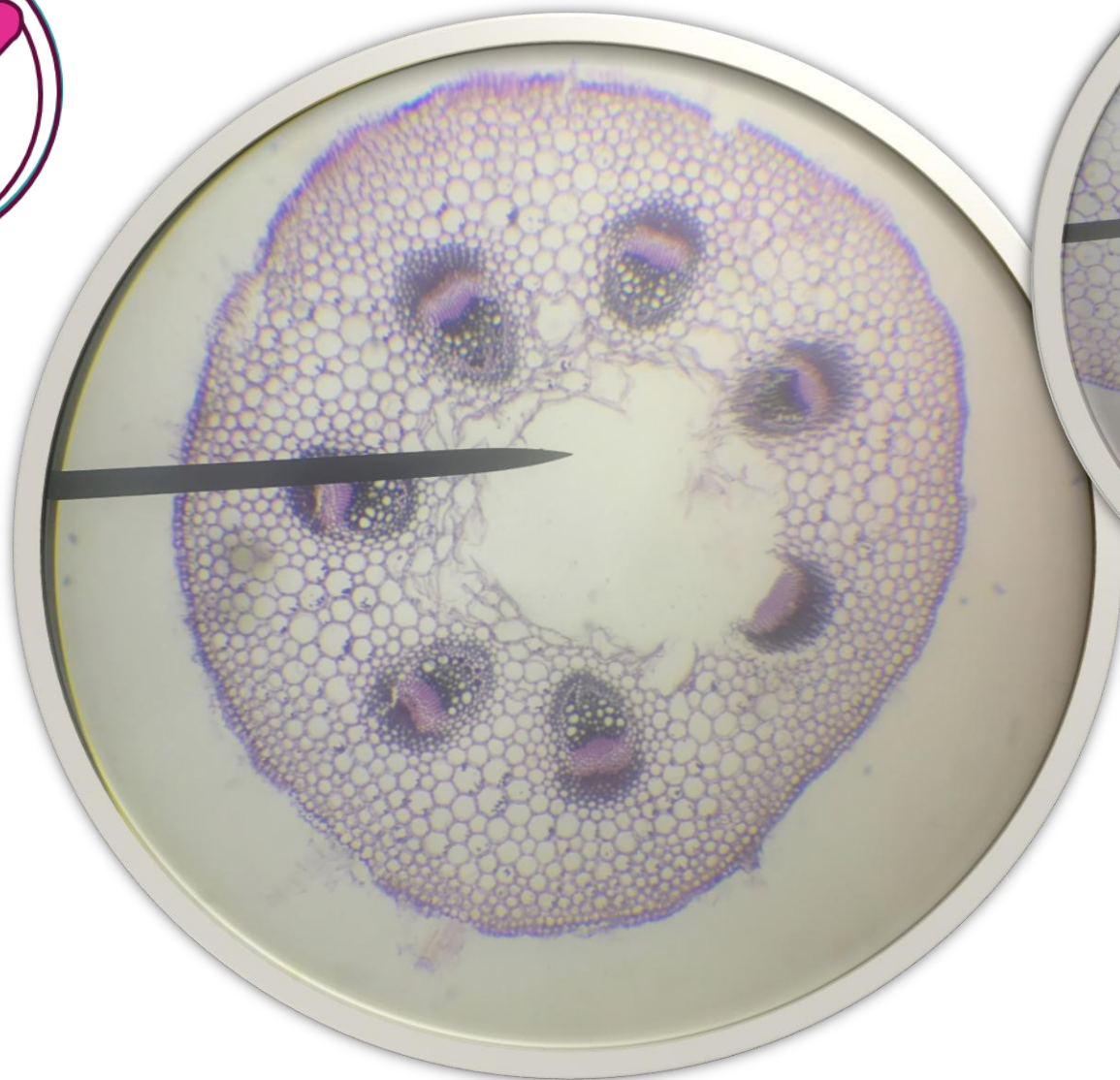
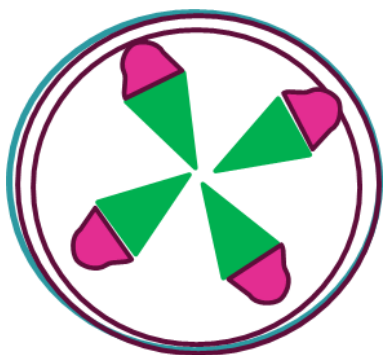
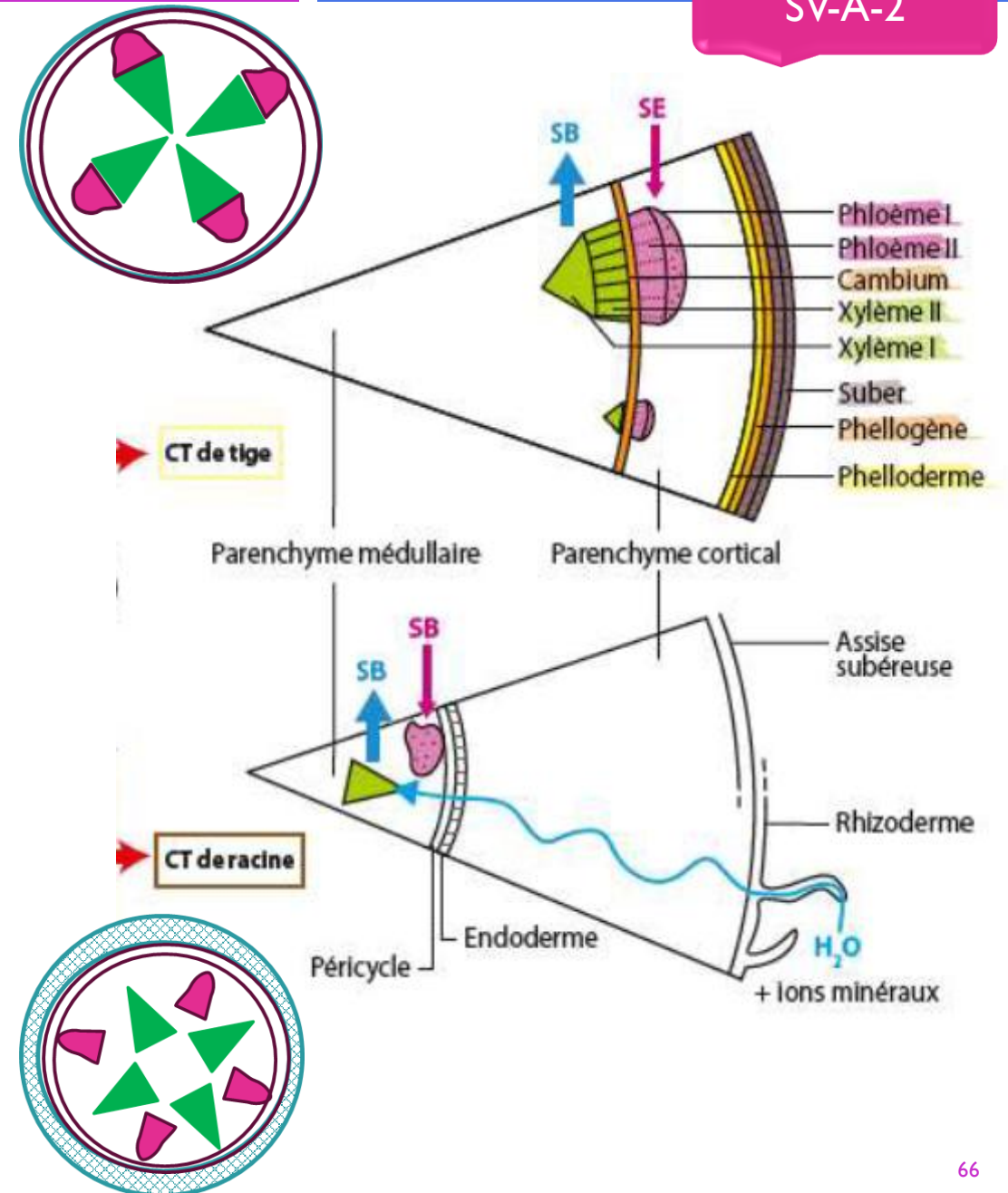
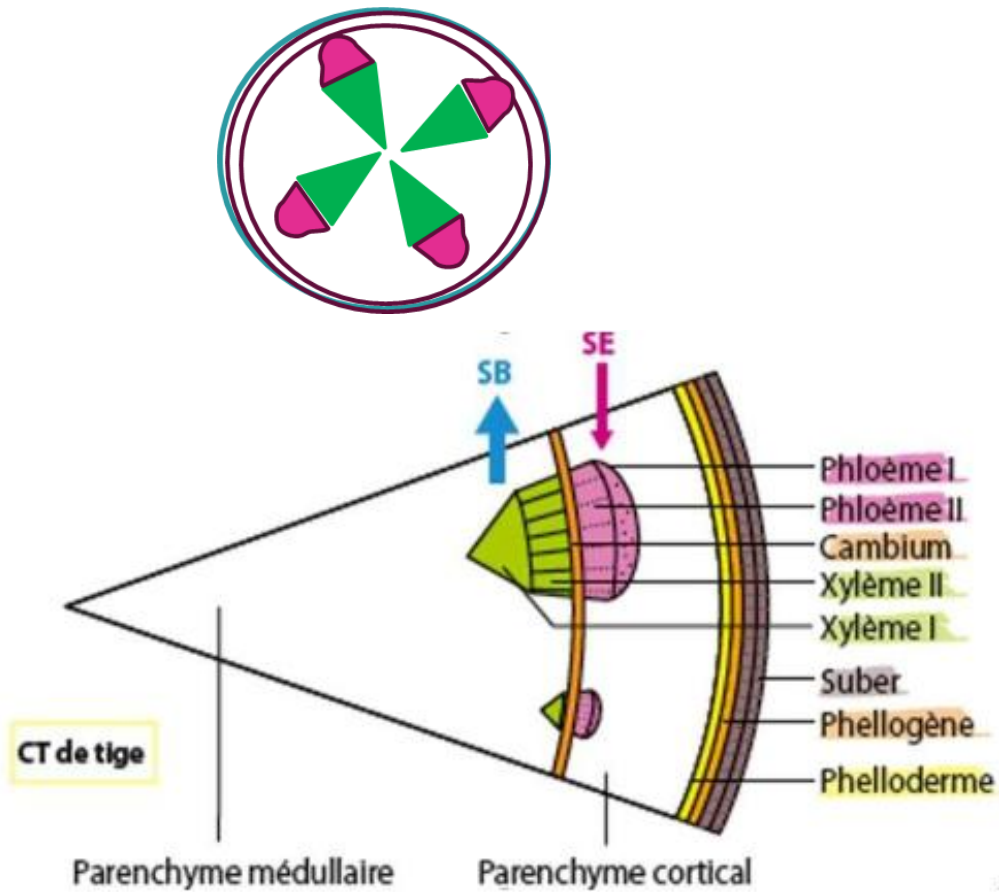


Figure 22 : schéma de vaisseaux de Xylème observés en CL



À l'assaut  
d'une  
diagnose!





Bilan: comparaison histologique CT de racine vs tige d'une dicotylédone

# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

## 2. Structure du Xylème



### 2.2. Une structure des vaisseaux offrant une faible résistance à l'écoulement (loi de Poiseuille)

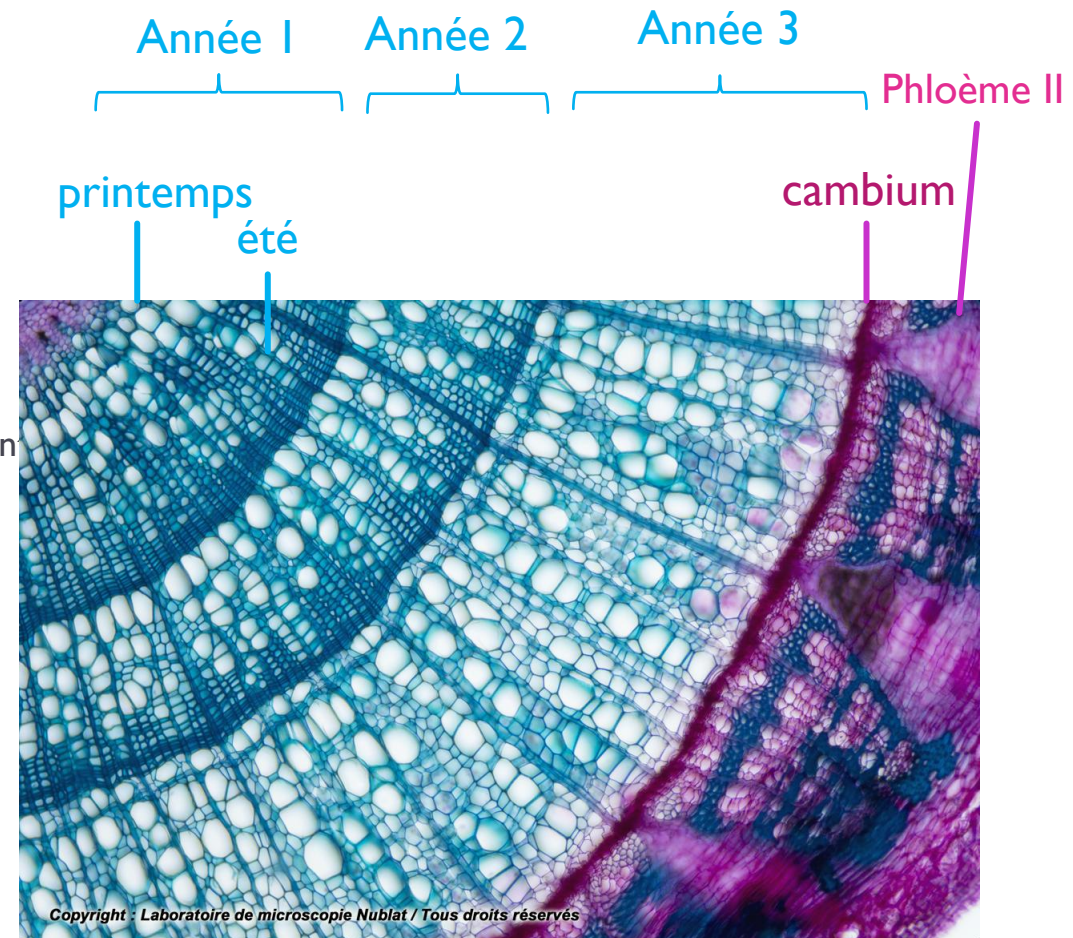
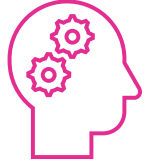
- **sève brute : voie apoplasmique**; cellules mortes (chacune nommée élément de vaisseau), à paroi **lignifiée**, communiquant par des **perforations** (hydrolyse totale de la paroi).
- résistance à l'écoulement donnée par **Poiseuille**:  $R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$  avec  $\eta$  viscosité (faible pour la sève brute),  $l$  longueur,  $r$  rayon du conduit
  - ⇒ **Résistance à l'écoulement faible** dans les vaisseaux de Xylème avec un **rayon important** et une **viscosité faible**
  - débit  $Q$  (volume de liquide transporté par unité de temps) de sève brute débit  $\sim$  vitesse d'écoulement  $Q = - \frac{\Delta P}{R}$  (cf  $U = RI \leftrightarrow I = U/R$ ) avec  $1/R$  conductivité hydraulique
  - **différence de pression** = moteur de l'écoulement
  - N.B.: flux hydrique selon potentiels décroissants
  - $\Rightarrow \Delta P = P_2 - P_1 < 0 \Rightarrow$  signe moins
- Les vaisseaux des éléments conducteurs **optimisés** :
  - **larges de 20 à 400 $\mu$ m ( $r$  grand)**(les trachéïdes ne font que 10  $\mu$ m de diamètre, le rayon divisé par 10 impose une résistance 10.000 fois plus grande qu'un vaisseau parfait de métaxylème )
  - **absence** de la plupart des parois transversales  $\Rightarrow \searrow$  frottements
  - **Paroi lignifiée** des vaisseaux vrais  $\Rightarrow$  **hydrophobe**  $\Rightarrow \searrow$  **forces de frottement**
  - la sève brute est diluée donc **peu visqueuse**

# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

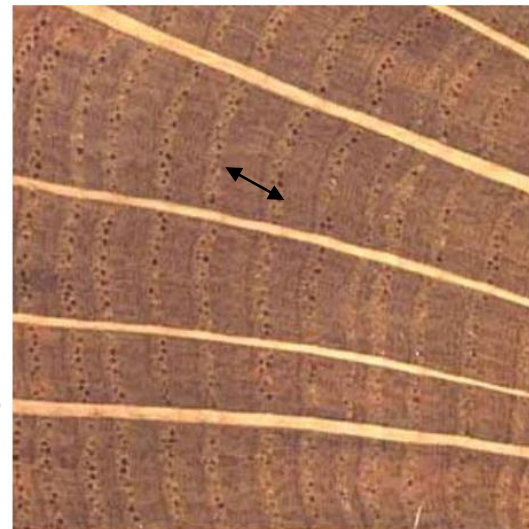
## 2. Structure du Xylème

### 2.2. Une structure des vaisseaux offrant une faible résistance à l'écoulement (loi de Poiseuille)

- **Bois de printemps = gros vaisseaux** ⇒ circulation très rapide de la sève brute
- **Bois d'été = vaisseaux plus fins** ⇒ circulation plus lente
  - moindre évaporation limitant la dessiccation
  - cambium arrête de fonctionner en automne et en hiver (cf BCPST2).
- **Bilan :** la vitesse de conduction de la **sève brute** est supérieure à **10m/h** dans les vaisseaux (50 m/h dans les gros vaisseaux du bois de printemps > 200 μm qui assurent 97% du transport de SB) alors qu'elle est inférieure à 1m/h dans les trachéides



I cerne annuel



CT d'une tige de Dicotylédone pérenne (tronc) au niveau du duramen (bois totalement lignifié = mort)

CT d'une tige de Dicotylédone pérenne observée au MO après coloration au carmino-vert de Mirande (Source Nublat)

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

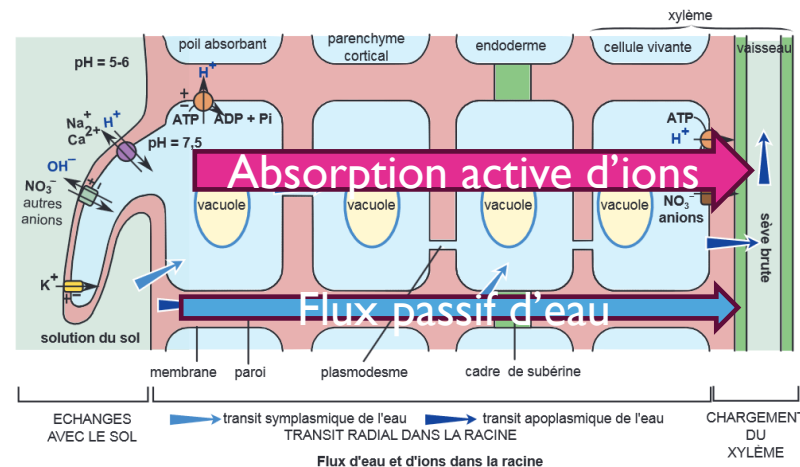
# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

## 3. La poussée racinaire

- poils absorbants **absorption active des ions** et acheminement vers Xylème
- **Endoderme**: empêche ions de ressortir vers le cortex racinaire et le sol.
- vaisseaux du xylème : **solution plus concentrée en ions que la solution du sol**
  - ⇒ **potentiel osmotique** (potentiel hydrique) au sein du xylème est donc plus négatif que celui du cortex racinaire
  - ⇒ entrée d'eau dans les vaisseaux du xylème **par osmose** = « **poussée racinaire** » ⇒ **ascension de la sève brute**.
  - ⇒ phénomène assez faible pour vaincre la pression et complété par **l'évapotranspiration foliaire**.



*guttation visible le matin lorsque l'évapotranspiration foliaire n'est pas encore bien amorcée (source Wikipédia)*



*Pleurs de vigne février 2021 Savennières (S. Dalaine)*

## PLAN DU COURS

### I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol

### B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine

- 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
- 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
- 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques

#### A. Les stomates : contrôle des flux hydriques

- 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
- 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

#### B. La feuille, lieu de la photosynthèse

- 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
- 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme

#### A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée

#### B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits

- 1. Les feuilles : des organes source
- 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
- 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique

- 1. Mise en place de l'association symbiotique
- 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# C.MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.1. Mise en évidence d'une évapotranspiration



- Plâtre: nombreux petits ménisques
  - ⇒ **Rétention de l'eau** par les ménisques d'autant plus grande que rayon ménisque petit
  - ⇒ Montée d'eau quand plâtre par force de cohésion des molécules d'eau sous tension
- Montée de l'eau d'autant plus importante que évapotranspiration croissante
  - ⇒ **forces de cohésion** entre les molécules d'eau permettent ascension de SB au-delà de 10 m > **tension**

⇒ C'est la théorie de la **cohésion-tension**.

⇒ Évaporation foliaire = moteur de l'ascension de SV **en journée**

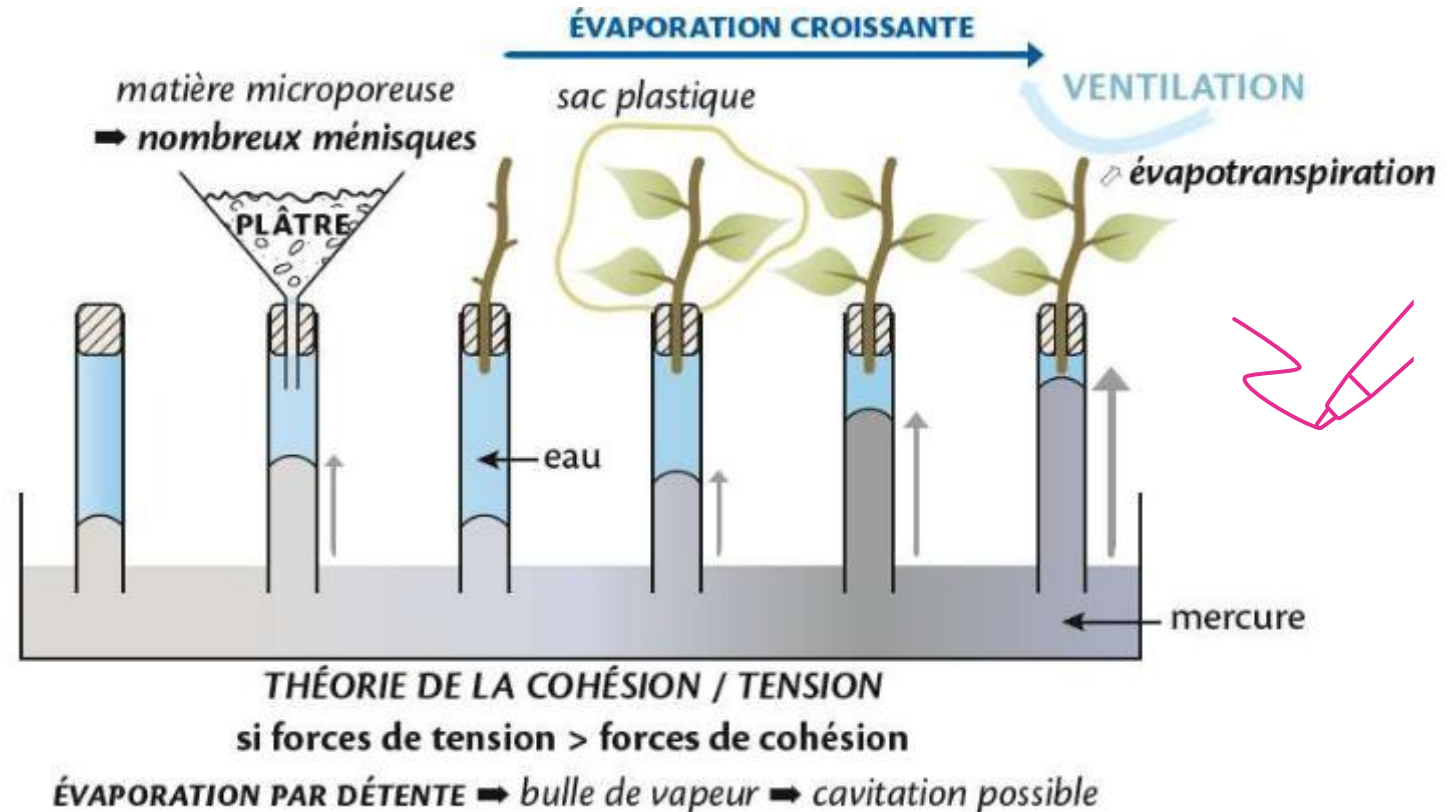


Figure 23 : mise en évidence expérimentale de l'ascension de la SB par cohésion/tension (source Aurélie Denis)



## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.1. Mise en évidence d'une évapotranspiration

- **Rétention de l'eau** par les ménisques d'autant plus grande que **rayon ménisque petit**

- **Loi de Jurin:** 
$$\psi_m = \frac{-2T}{r}$$

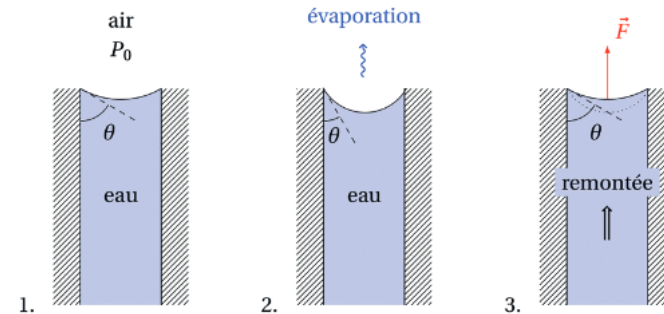
Avec  $T$ : tension superficielle et  $r$ : rayon du ménisque

- ⇒ Eau retenue par sa tension superficielle  $T$  (signe -)
- ⇒ Représente la traction de la matrice (= force du ménisque liée à  $r$ )
- ✓ **Au niveau des particules du sol, empêchant absorption racinaire**
- ✓ **Au niveau des cellules du parenchyme lacuneux : traction de la sève brute**



#### FOCUS Physique-Chimie.

#### Le lien entre la transpiration et l'appel d'eau dans les vaisseaux du xylème



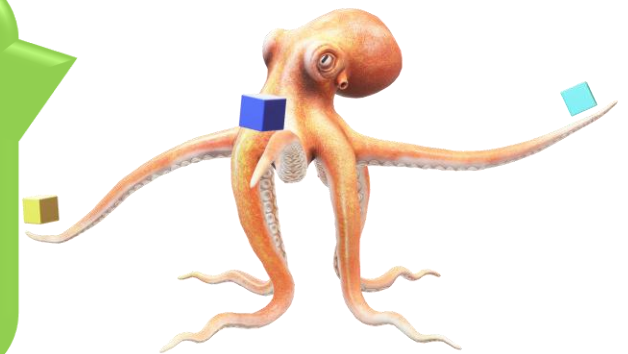
1. La paroi des cellules des chambres sous-stomatiques, est le lieu de l'évaporation. L'eau entre les microfibrilles de cellulose est à l'équilibre mécanique avec l'air extérieur. Le ménisque à l'interface air-eau forme un angle  $\theta$  par rapport à la microfibrille.
2. Lors de l'évaporation de l'eau, les ménisques se creusent : l'angle  $\theta$  diminue.
3. La force de tension superficielle est proportionnelle au cosinus de cet angle. Elle augmente. Cette force de rappel tire toute la colonne, qui monte en bloc, l'eau formant un réseau cohésif.

Figure 23 : lien entre ménisque et tension superficielle: plus le ménisque est creusé, plus la tension superficielle est grande

Diamètre des vaisseaux de Xylème soumis à deux lois physiques ambivalentes:

- Loi de Poiseuille sur la résistance à l'écoulement favorisant un grand rayon
- Loi de Jurin: rétention d'eau d'autant plus grande que le rayon est petit

⇒ considérons que Poiseuille permet d'expliquer l'ascension de SB au sein des vaisseaux et que Jurin s'applique aux microfibrilles de cellulose des cellules du parenchyme lacuneux





## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.2. Une évapotranspiration mettant la SB sous tension

**Définition :** une **circulation sous tension** de la sève brute  
ssi:  $\Psi_H \text{ sève brute} < \Psi_H \text{ atm.}$

- Mise sous tension rendue possible par les **forces de cohésion** entre les molécules d'eau
- Rappels : molécules d'eau dipolaires
- **changement du diamètre de l'arbre qui suit un rythme circadien**
  - Léger décalage de diminution du diamètre entre cime et sol met en évidence rôle des feuilles (près de cime) et donc de l'aspiration foliaire

Interactions H

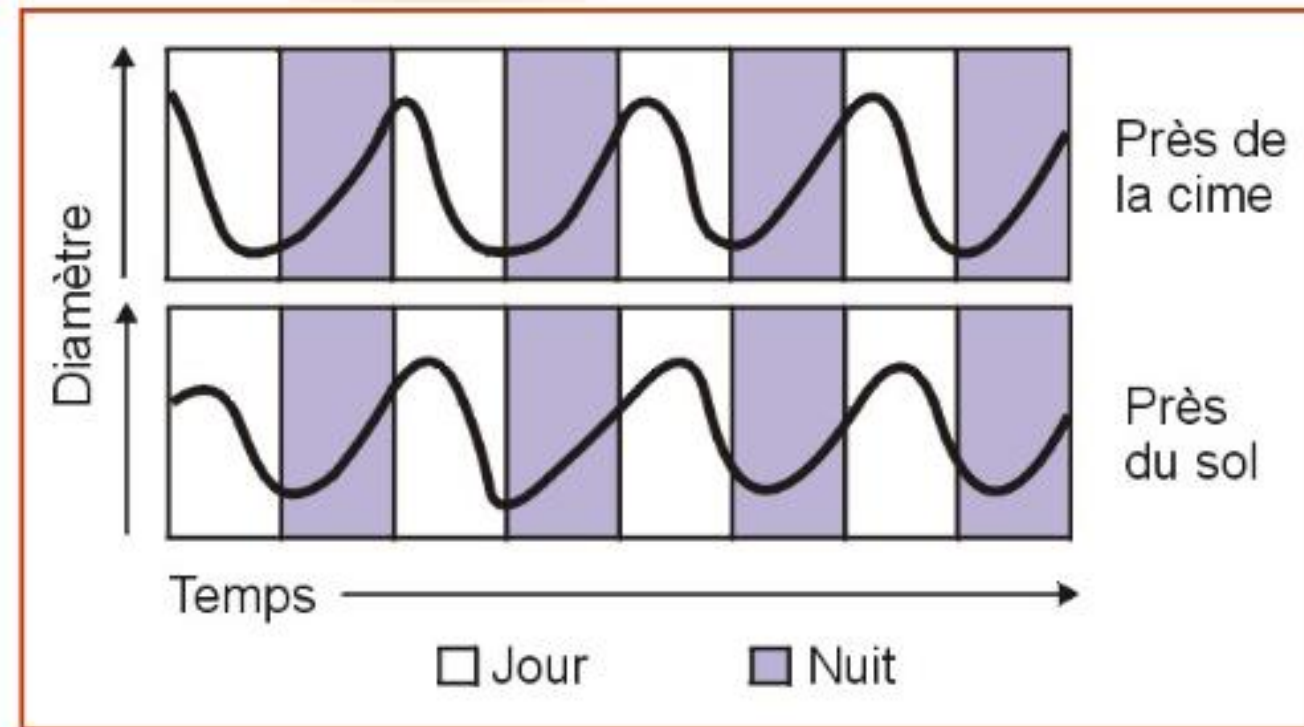
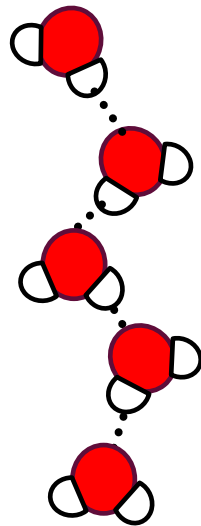


Figure 24: mise en évidence d'une **circulation sous tension** induisant une variation du diamètre du tronc près de la cime (source Aurélie Denis)

# C.MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.2. Une évapotranspiration mettant la SB sous tension

**Définition** : une **circulation sous tension** de la sève brute ssi:

$$\Psi_H \text{ sève brute} < \Psi_H \text{ atm.}$$

- La paroi des vaisseaux du xylème est épaisse et **lignifiée** ce qui la rend particulièrement **résistante au collapsus**.
- **Si force de tension > force de cohésion**
  - ⇒ **Rupture de colonne d'eau**
  - ⇒ Eau s'évapore par détente
  - ⇒ **bulle de vapeur d'eau** qui peut croître si des gaz dissous provenant des tissus voisins l'enrichissent :
  - ⇒ bulle d'air se forme = **cavitation**



*Cavitation dans un vaisseau de xylème  
(source André Granier site plantes-et-eau)*

- Cause de cavitation:
  - transpiration excessive par sécheresse (solution: dépression de midi)
  - cycle gel/dégel
  - blessure par une piqure d'insecte parasite
    - ⇒ perturbation très importante si gros vaisseau ou si plusieurs gros vaisseaux adjacents
    - ⇒ sève brute ne circule plus
    - ⇒ Dessèchement les feuilles
    - ⇒ Mort du végétal

# CIRCULATION DE L'EAU AU SEIN D'UNE PLANTE

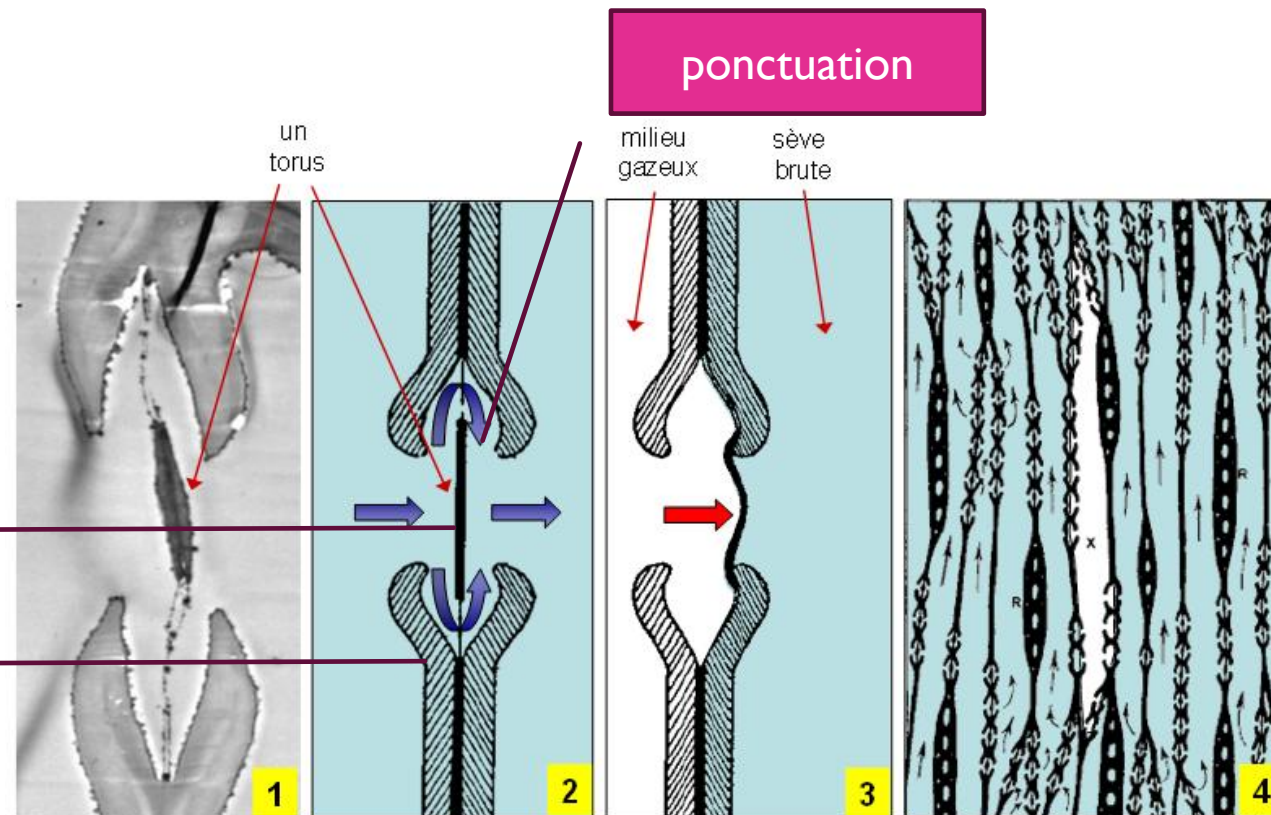
- Cavitation: formation de bulles de vapeur d'eau souvent par action mécanique (ex: aspirer trop vite dans une paille) => embolie souvent provoquée par la sécheresse
- Chez les conifères les ponctuations entre 2 vaisseaux de xylème forment une soupape de sécurité



Paroi primaire maintenue

Paroi secondaire détruite

Cavitation dans un vaisseau de xylème  
(source André Granier site plantes-et-eau)



Fonctionnement d'une ponctuation chez un conifère (source plantes-et-eau)

# CIRCULATION DE L'EAU AU SEIN D'UNE PLANTE (SUITE)

- À l'échelle de la plante, le potentiel hydrique d'un organe est une grandeur physique qui traduit son statut hydrique (cf TP-I-SV-C)

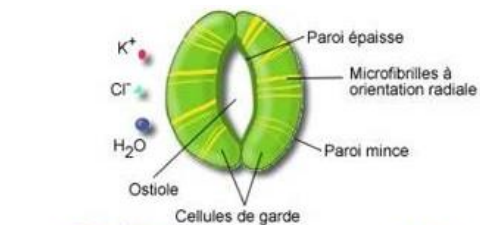
$$\psi = \psi_P + \psi_S + \psi_m + \psi_g$$

$\psi$ : potentiel hydrique du compartiment

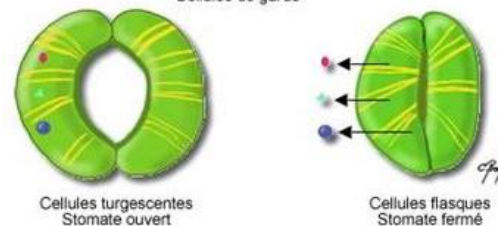
$\psi_P$ : potentiel hydrostatique (-pression de turgescence liée à la paroi pectocellulosique)

$\psi_g$ : potentiel gravitaire (négligeable à l'échelle du tissu)

$\psi_S$ : potentiel osmotique = - pression osmotique ( $\pi$ ) liée à la concentration en solutés (loi de Van't Hoff)

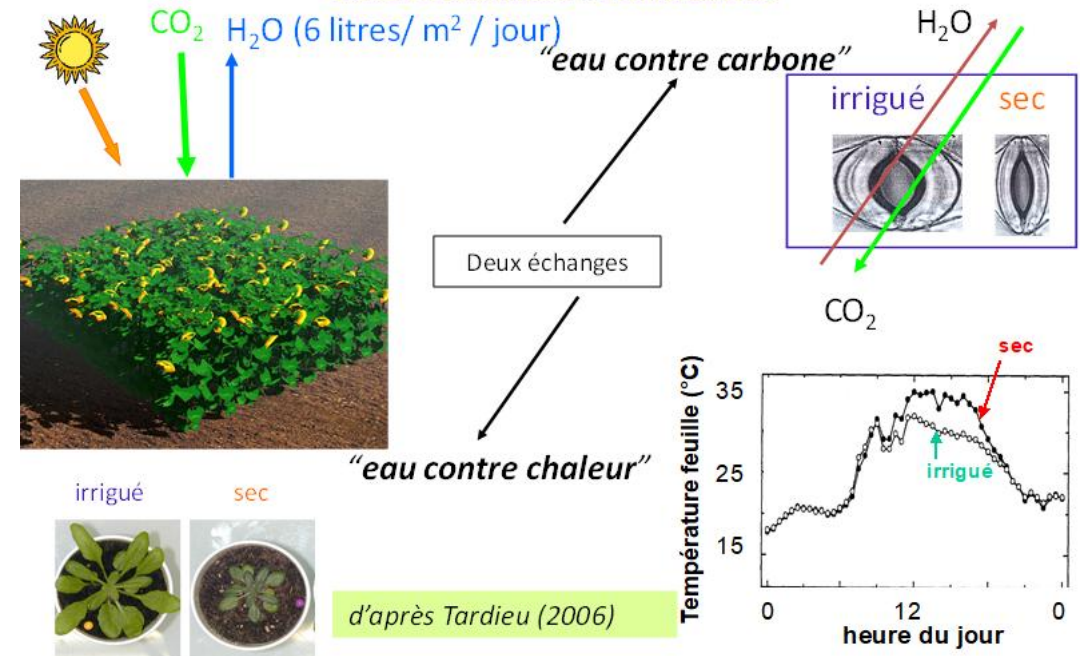


Le stomate se ferme quand diminue la pression de turgescence



La plante est une machine à capter l'énergie solaire et le CO<sub>2</sub>

ON NE POURRA JAMAIS PRODUIRE SANS EAU

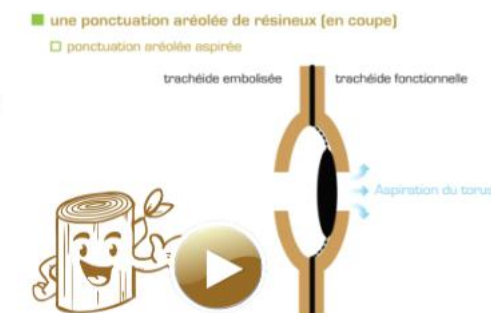
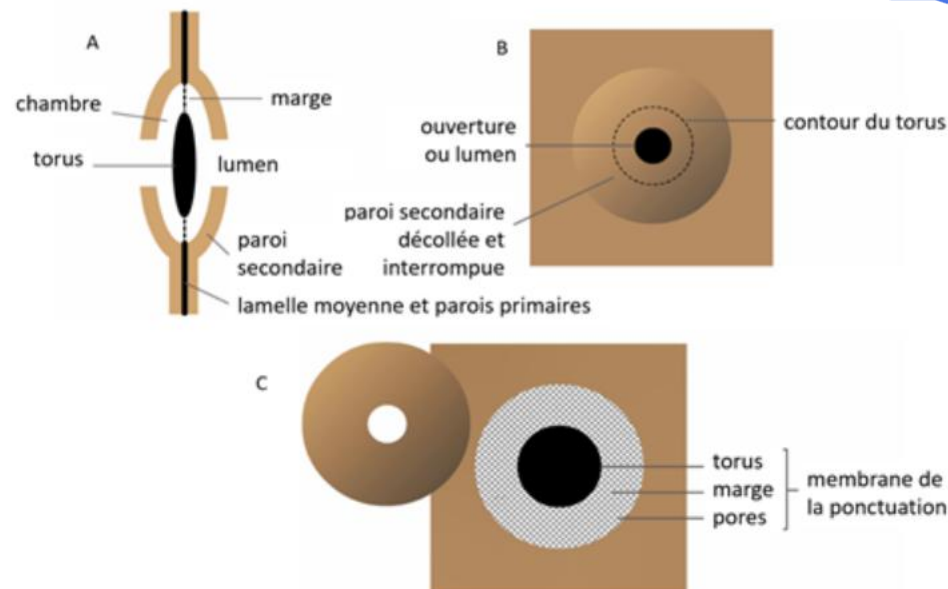


IV.1.1. Un peu d'écophysologie

2

## Force de cohésion interne

- **Ponctuation:** entre deux éléments vasculaires, zone de contact caractérisée par une lamelle moyenne et une **paroi primaire épaissie**, mais **sans paroi secondaire**. La lamelle moyenne et la paroi I sont partiellement hydrolysées.
- Ponctuation: **passage latéral de sève d'un élément de vaisseau à l'autre**
- Les ponctuations aréolées ~ petites valves susceptibles de se fermer de façon plus ou moins irréversible.
  - ⇒ **évite l'embolie** (remplissage d'un élément de xylème par de l'air consécutif à la cavitation si trop forte transpiration => trop forte tension dans colonne d'eau => rupture de la colonne d'eau => arrêt de l'ascension de la SB).
  - ⇒ la fermeture est obtenue par aspiration du torus qui vient se plaquer contre la paroi secondaire de la trachéide qui l'a aspiré, et en obture l'ouverture



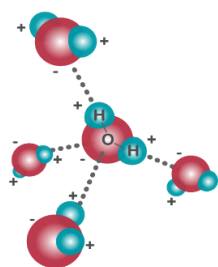
Représentation schématique d'une ponctuation aréolée : en A sur une coupe tangentielle, en B et C sur une coupe radiale. En C, la paroi secondaire est enlevée, tel un couvercle, pour montrer la paroi primaire sous-jacente[4].

### Le mécanisme de montée de sève brute dans le bois

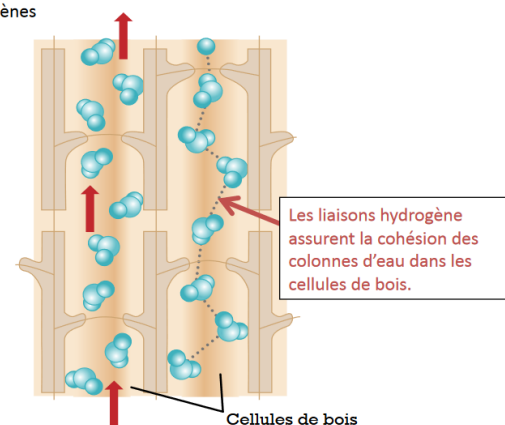
#### LA COHESION

Les molécules d'eau  $H_2O$  sont polaires avec :

- un pôle négatif : l'oxygène
- deux pôles positifs : les deux hydrogènes



**Liaison hydrogène :** attirance entre les pôles opposés de deux molécules d'eau voisines



# C. MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME



## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.4. Une évaporation d'eau au niveau des ménisques du parenchyme lacuneux faisant monter la sève brute Une transpiration et un assèchement de l'air des lacunes grâce à l'énergie solaire

■ **potentiel hydrique l'air  $\psi_{H\ air}$  TOUJOURS  $\leq 0$**

■  $\psi_{H\ air} = \frac{RT}{V_{MH_2O}} \cdot \ln(HR)$  avec  $V_{MH_2O}$  volume molaire de l'eau et  $HR$  humidité relative

- $\psi_{H\ air} = 0$  si l'atmosphère saturée en eau (Humidité Relative  $HR = 1$ )  
⇒ Évaporation impossible
- $\psi_{H\ air} = -168\ MPa$  si  $HR = 0,5$  à  $20^\circ C$
- $\psi_{H\ air} \searrow$  : si  $T \nearrow$  soit si  $HR \searrow$
- $\psi_{H\ lacunes} = -1,5\ MPa$  car air presque saturé en eau (99%)  
⇒ La vapeur d'eau s'échappe de l'air des lacunes par les stomates dans le sens des  $\psi_H$  décroissants
- $\psi_{H\ apoplasme} = -0,8\ MPa$

⇒  $\psi_{H\ apoplasme} > \psi_{H\ lacunes} > \psi_{H\ air}$

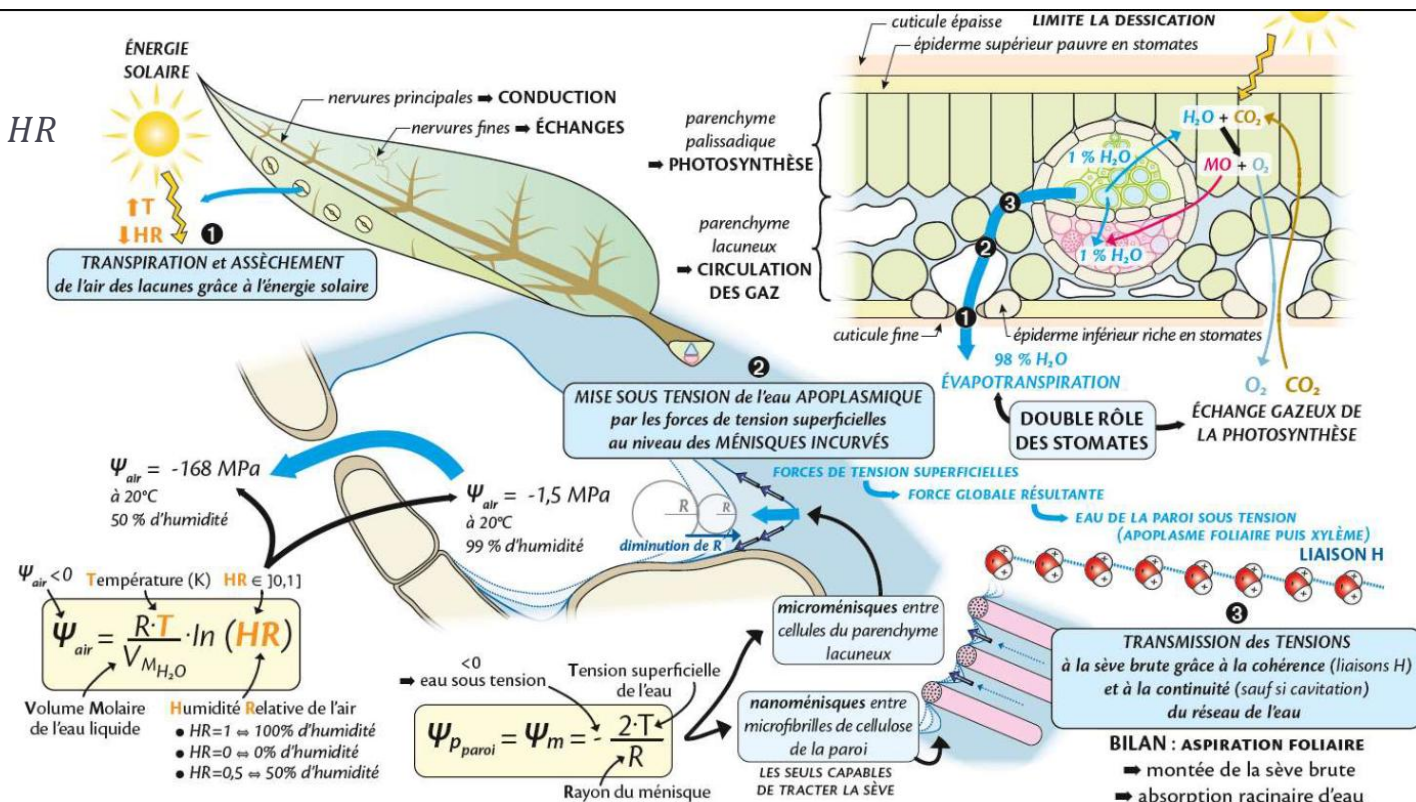


Figure 25 : l'évaporation foliaire, un flux d'eau de la sève brute vers les lacunes permis par la mise sous tension au niveau des ménisques incurvés de la cellulose des parois (Source Aurélie Denis)

## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.4. Une évaporation d'eau au niveau des ménisques du parenchyme lacuneux faisant monter la sève brute

Une transpiration et un assèchement de l'air des lacunes grâce à l'énergie solaire

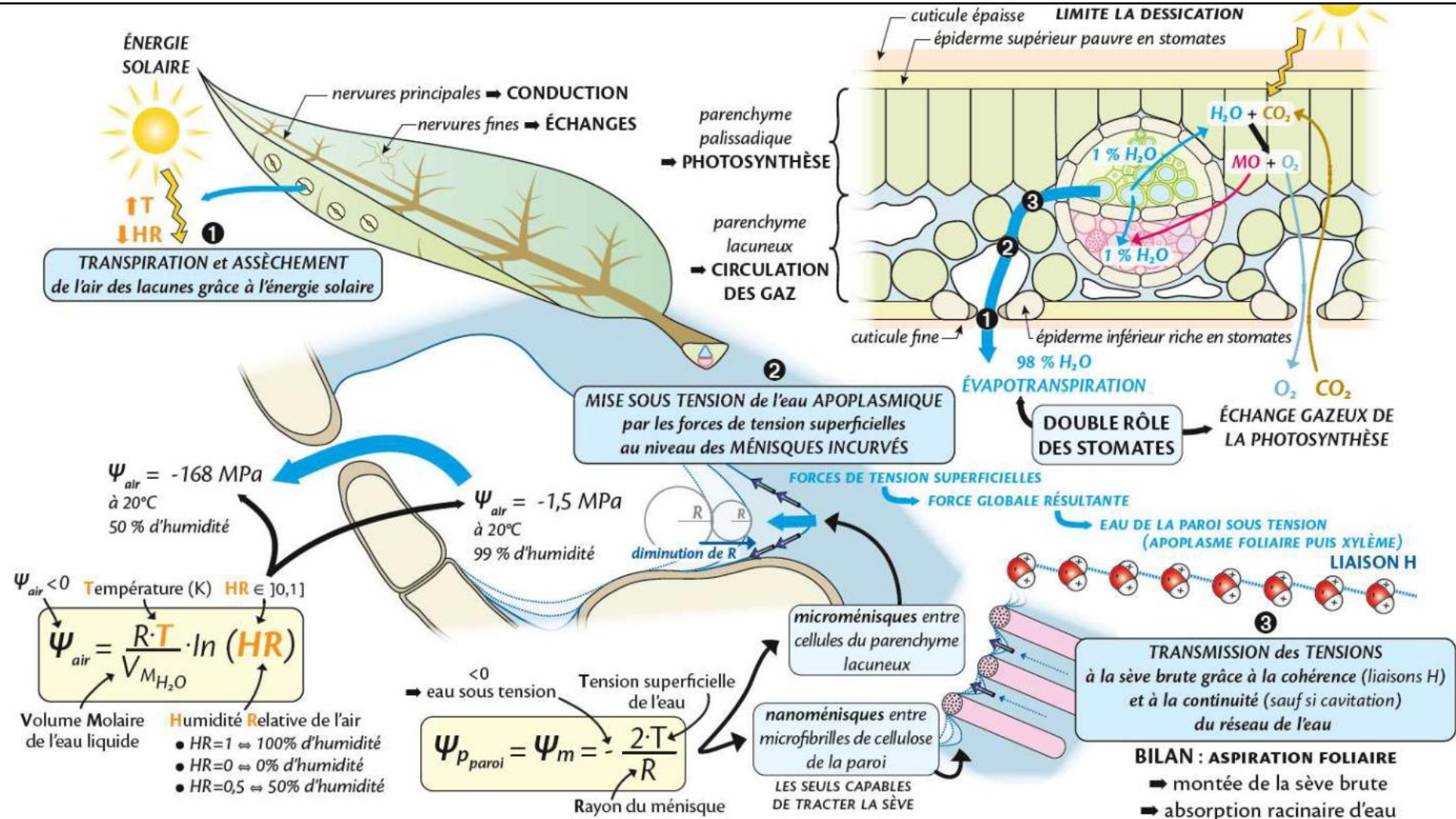
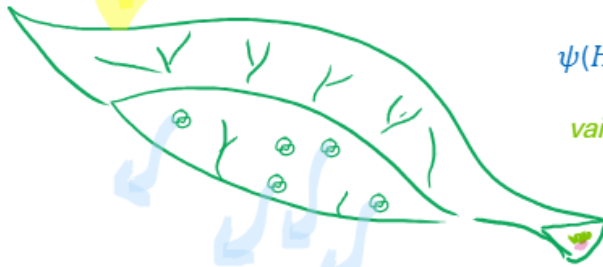


Figure 25 : l'évaporation foliaire, un flux d'eau de la sève brute vers les lacunes permis par la mise sous tension au niveau des ménisques incurvés de la cellulose des parois (Source Aurélie Denis)



1- Energie solaire  
=> évaporation de  
l'eau de la chambre  
sous-stomatique (cf  
chaleur latente de  
vaporisation)



évaporation de l'eau  
 $\psi(H \text{ air}) = -168 \text{ MPa}$  si HR=0,5 à 20°C

3- transmission de la tension  
à la SB grâce aux forces de  
cohésion entre molécules  
d'eau => ascension de SB

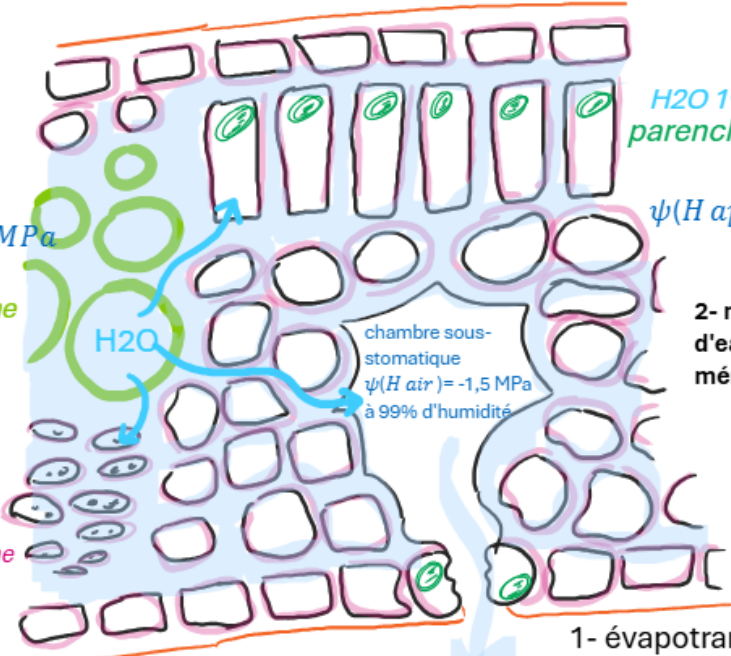
$\psi(H \text{ xylème}) = -0,8 \text{ MPa}$

vaisseaux de Xylème

H2O 1% SE  
(osmose) mise  
en circulation  
sous pression

tubes du Phloème

face adaxiale



H2O 1% pour photosynthèse  
parenchyme palissadique chlorophyllien

$\psi(H \text{ apoplasme}) = -0,8 \text{ MPa}$

2- mise sous tension des molécules  
d'eau de l'apoplasme au niveau des  
ménisques (micro et nano)

parenchyme lacuneux chlorophyllien

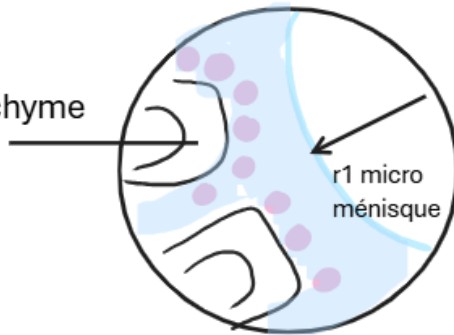
1- évapotranspiration

face abaxiale

évaporation de l'eau  
 $\psi(H \text{ air}) = -168 \text{ MPa}$  si HR=0,5 à 20°C

H2O 98% évapotranspiration =>  
ascension sous tension-cohésion

cellule du parenchyme  
lacuneux



nuit dans la chambre  
sous-stomatique



jour dans la chambre  
sous-stomatique

microfibrilles de cellulose,  
hydrophile

**L'évaporation foliaire et la mise sous tension de la sève brute**

# C.MECANISMES DE TRANSPORT DE LA SEVE BRUTE DANS L'ORGANISME

## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.4. Une évaporation d'eau au niveau des ménisques du parenchyme lacuneux faisant monter la sève brute

Une mise sous tension de l'eau de l'apoplasme du parenchyme lacuneux, au niveau des ménisques incurvés



- **paroi pectocellulosique** des cellules du **parenchyme lacuneux mouillable** car hydrophile (pectines imbibées d'eau).

⇒ A l'interface air/eau : ménisques incurvés

⇒ forces de tension superficielle

⇒ eau de l'apoplasme sous tension  $\psi_{\text{apoplasme}} = -0,8 \text{ MPa}$  pour des ménisques de  $0,2 \mu\text{m}$  environ

⇒ **nanoménisques** entre microfibrilles de **cellulose** tractent la sève brute

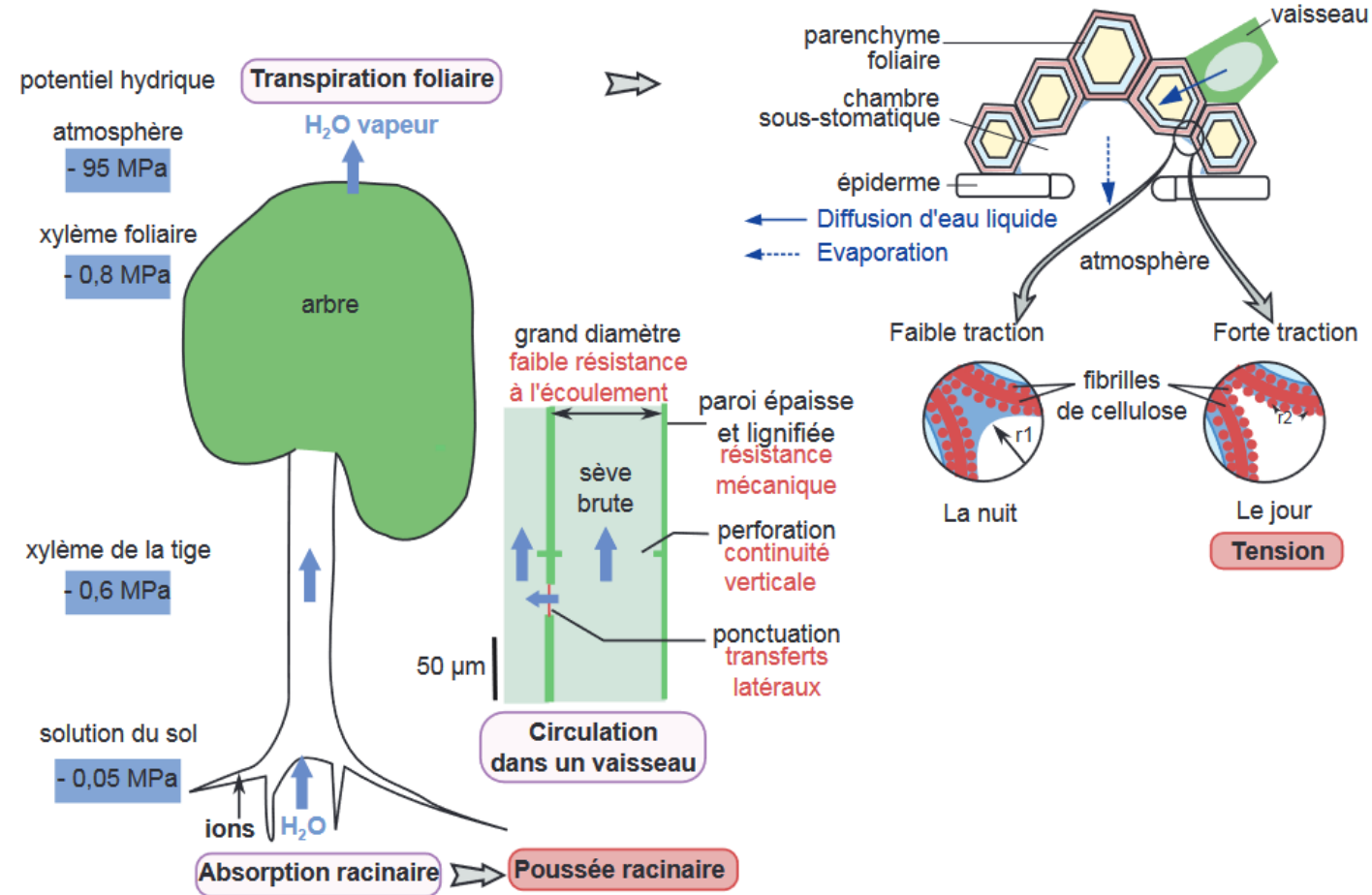


Figure 4.5 L'ascension de la sève brute.

Figure 26b: l'ascension de la sève brute (Dunod, j'intègre, ed. 2021)

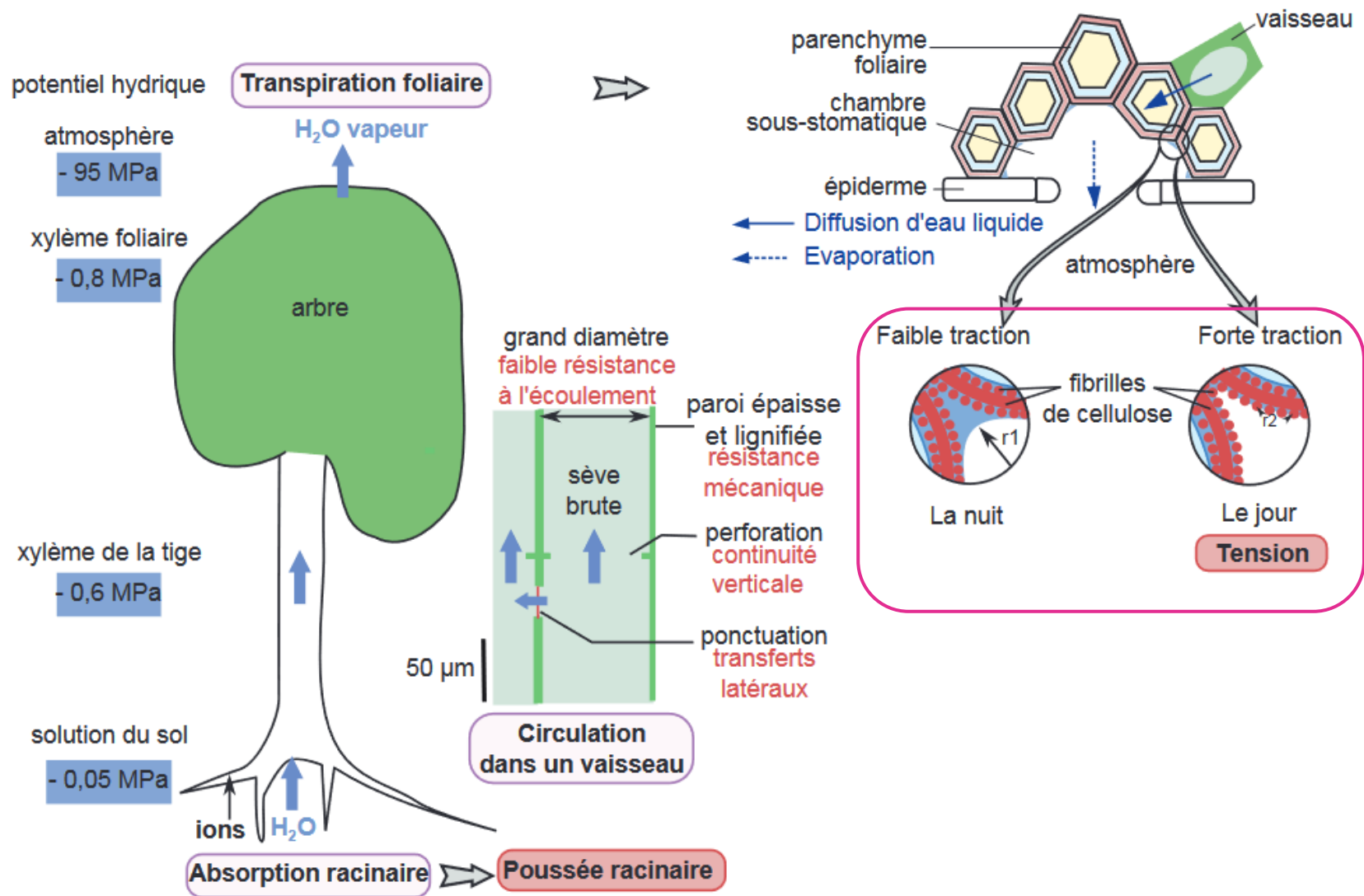


Figure 4.5 L'ascension de la sève brute.

Figure 27: l'ascension de la sève brute (Dunod, j'intègre, ed. 2021)

## 4. L'évapotranspiration foliaire

### 4.4. Une évaporation d'eau au niveau des ménisques du parenchyme lacuneux faisant monter la sève brute Transmission des tensions à la sève brute grâce à la cohésion entre molécules d'eau (théorie de la cohésion-tension)

- Transpiration foliaire (fonction de  $T^{\circ}\text{C}$ , humidité, ventilation donc de Energie solaire)
  - ⇒ Flux hydrique des lacunes vers air
- tension dans l'apoplasme via nanoménisques entre fibrilles de cellulose
  - ⇒ Flux hydrique du Xylème vers apoplasme du parenchyme lacuneux
- Potentiels hydriques décroissants de la racine à l'air
  - ⇒ Remontée de SB
- Force de cohésion entre molécules d'eau = **CONTINUUM HYDRIQUE**
  - ⇒ Montée sous tension-cohésion

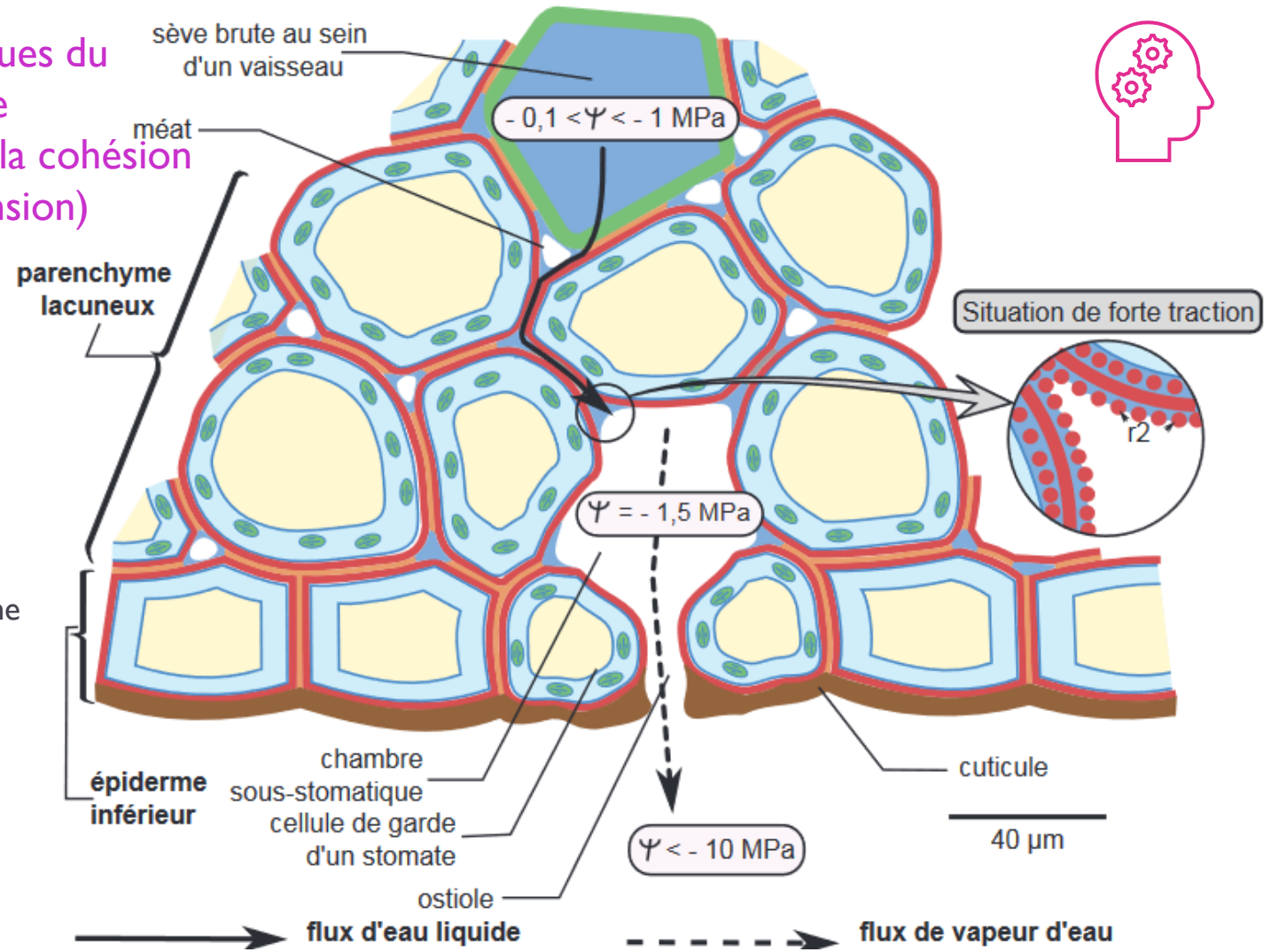


Figure 26 : le parenchyme lacuneux, les stomates et la traction de la sève brute (Dunod, J'intègre, ed. 2021)

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### **C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme**

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

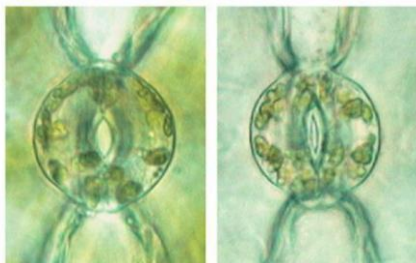
## II. LA FEUILLE : PHOTOSYNTHESE ET CONTROLE DES FLUX HYDRIQUES

### A. LES STOMATES : CONTROLE DES FLUX HYDRIQUES

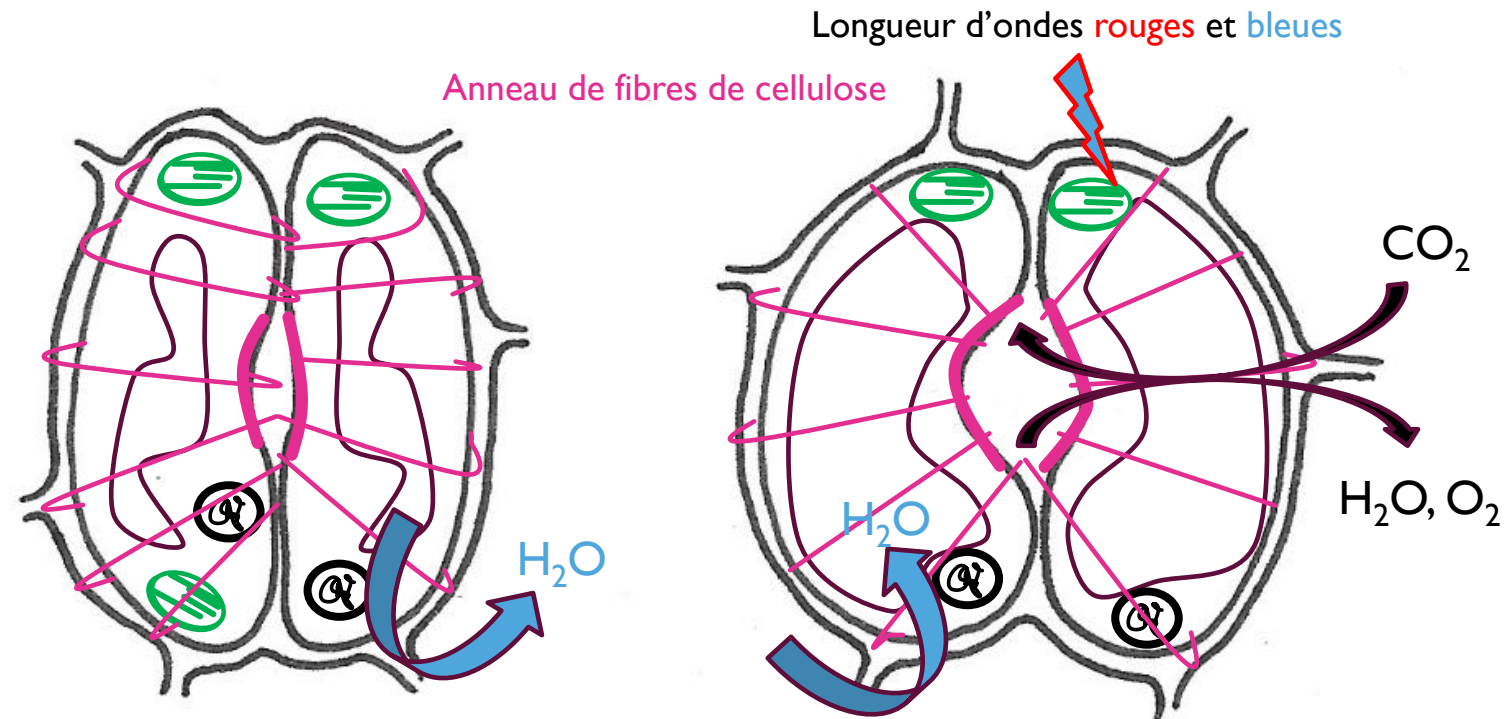
#### I. Structure et dynamique d'ouverture des stomates



- **stomates** = deux **cellules de garde** réniformes encadrant un pore, l'**ostiole**
  - **paroi** avec **épaississements en anneau** → en **turgescence**, l'**ostiole s'ouvre**
- **seules cellules de l'épiderme** pourvues de **chloroplastes** ⇒ photosynthétiques
- Chez les Eudicotylédones: majoritairement sur **l'épiderme inférieur** ⇒ limite l'évaporation
- Sortie de l'eau (**95%**)
- **lieux d'échange de gaz** réactifs ou produits de la photosynthèse et de la respiration.



Stomate (2 cellules de garde + 1 ostiole +/- ouvert par turgescence)



Stomate fermé (ostiole fermée):  
cellules de garde en plasmolyse  
Ex: nuit, dépression de midi

Stomate ouvert (ostiole ouverte):  
cellules de garde en turgescence  
Ex: jour

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### **C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme**

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# A. LES STOMATES : CONTROLE DES FLUX HYDRIQUES

## 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

### ■ Effet de la lumière

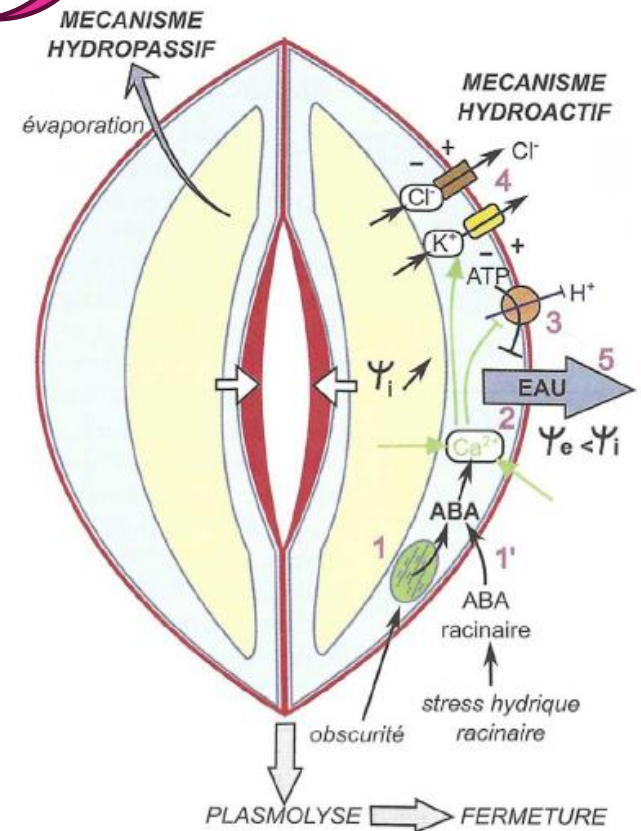
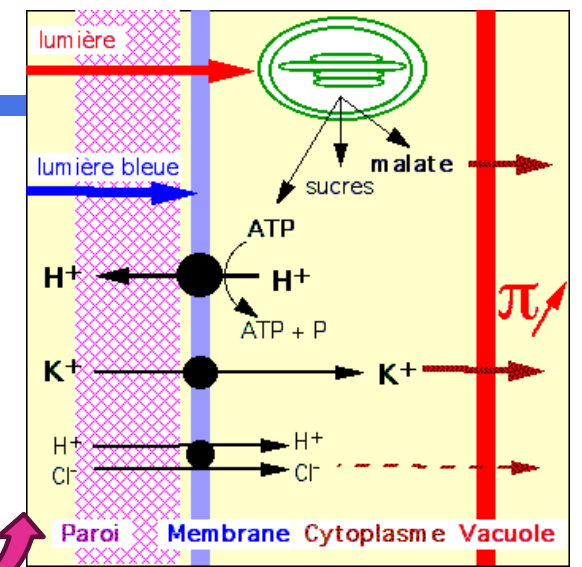
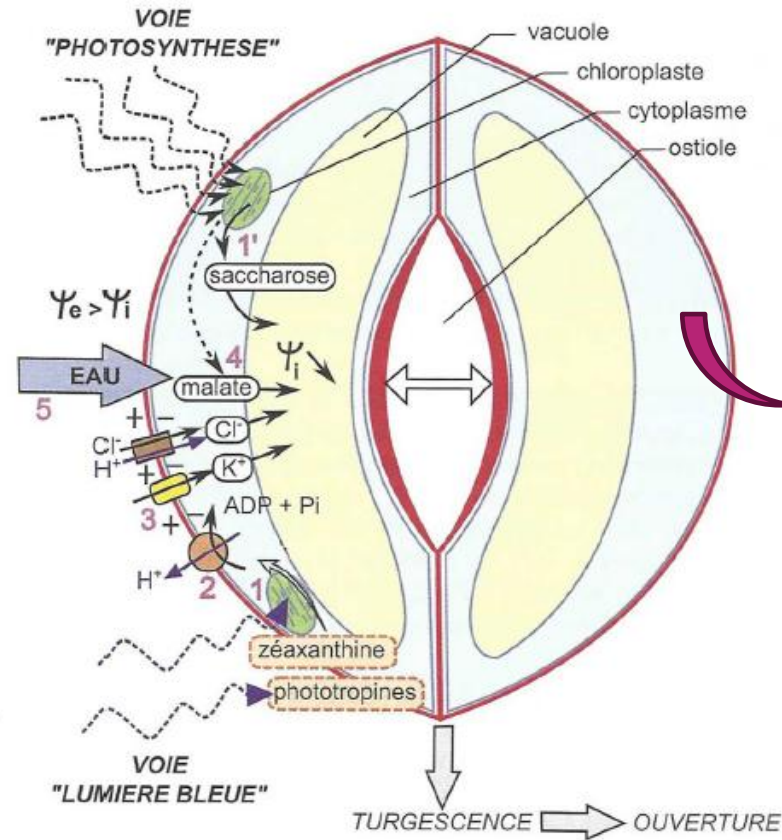
- photosynthétats osmotiquement actifs (saccharose, malate)
- ⇒  $\psi_s \Rightarrow$  Turgescence des cellules de garde  $\Rightarrow$  ouverture de l'ostiole

### ■ Effet de la lumière bleue : activation des pompes H<sup>+</sup> ATPases

- ⇒ Efflux d'ions H<sup>+</sup> vers paroi  $\Rightarrow$  influx de K<sup>+</sup> et de Cl<sup>-</sup> + exportation de malate par chloroplaste  $\Rightarrow$  entrée dans vacuole et  $\psi_s \Rightarrow$  Turgescence des cellules de garde  $\Rightarrow$  ouverture de l'ostiole

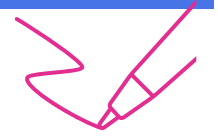
### ■ Effet du stress hydrique

- Si humidité relative faible (50% et moins)  $\Rightarrow$   $\nearrow \psi_H \Rightarrow$  plasmolyse des cellules de garde  $\Rightarrow$  fermeture de l'ostiole = **mécanisme passif**
- stress hydrique  $\Rightarrow$  synthèse d'acide abscissique (ABA) = phytohormone  $\Rightarrow$  sortie de K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et malate des cellules de garde  $\Rightarrow$   $\nearrow \psi_s \Rightarrow$  plasmolyse des cellules de garde = **mécanisme actif**



# A. LES STOMATES : CONTROLE DES FLUX HYDRIQUES

## 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates

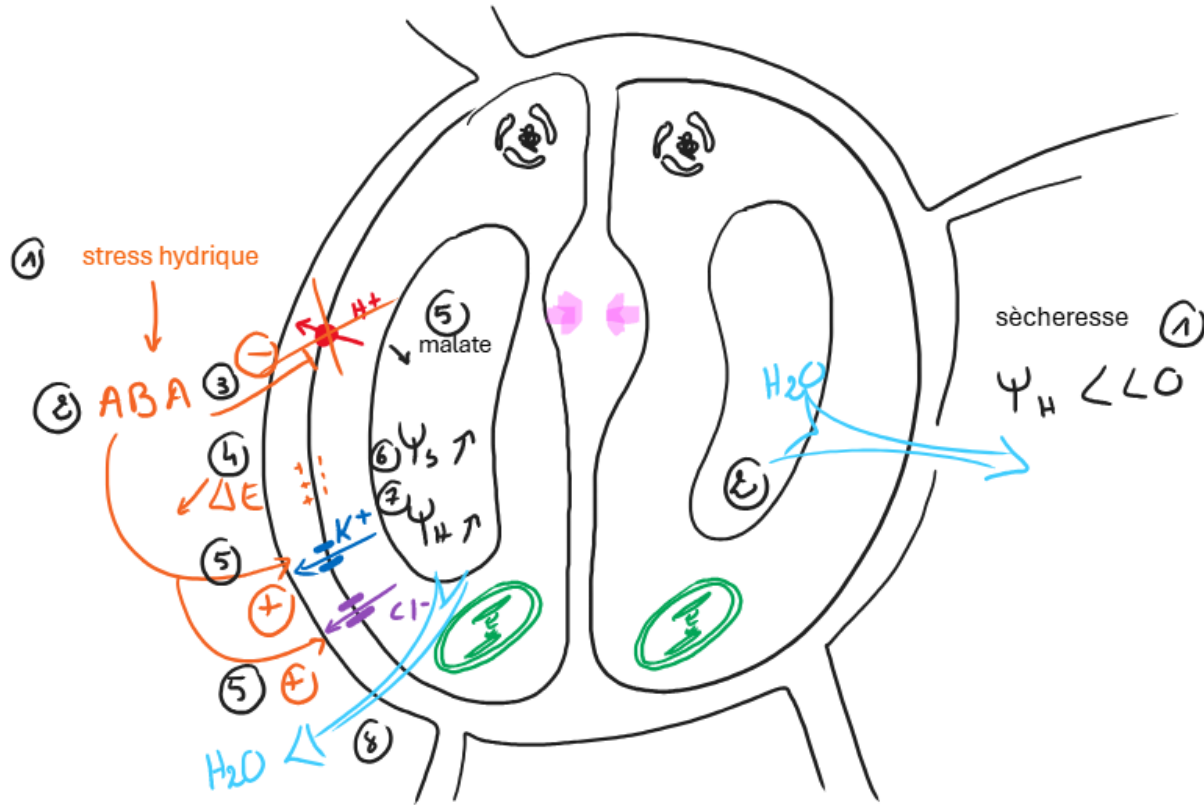


$\nearrow \psi_s \Rightarrow$  Sortie d'eau  $\Rightarrow$  plasmolyse  $\Rightarrow$  fermeture

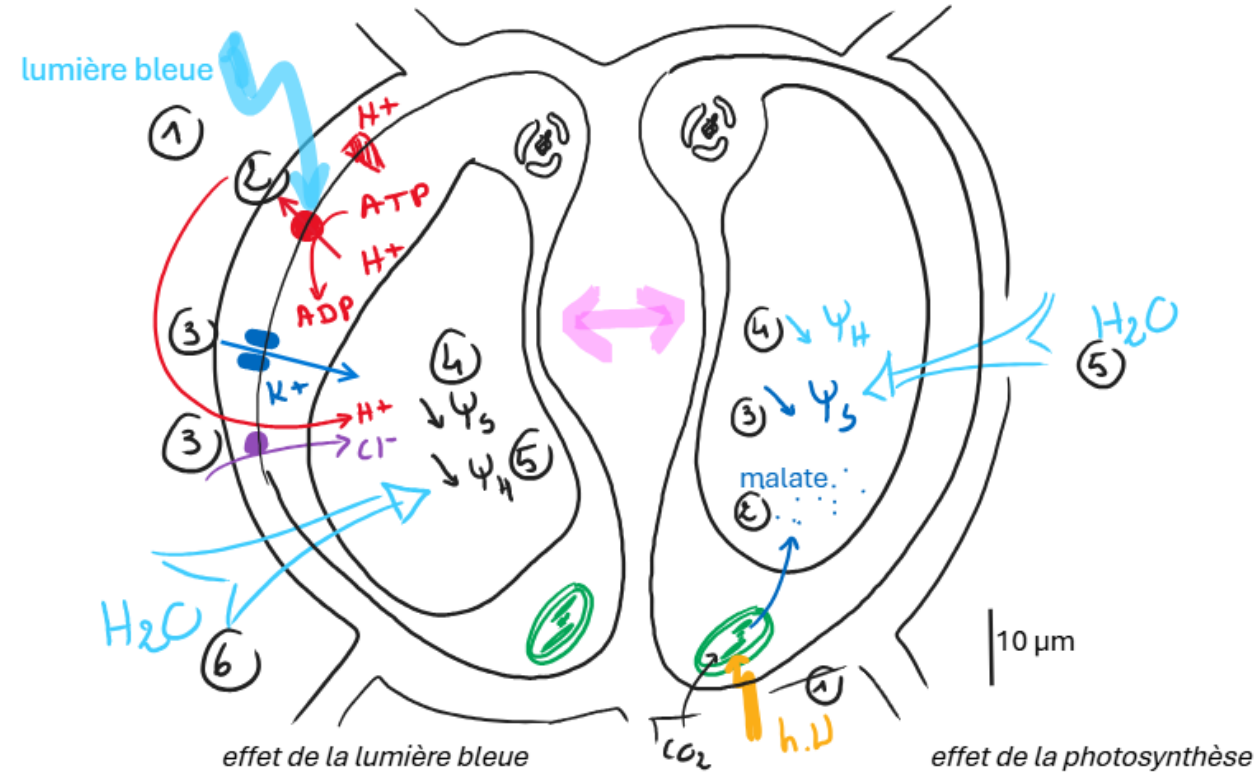
$\searrow \psi_s \Rightarrow$  entrée d'eau  $\Rightarrow$  turgescence  $\Rightarrow$  ouverture

Mécanisme actif

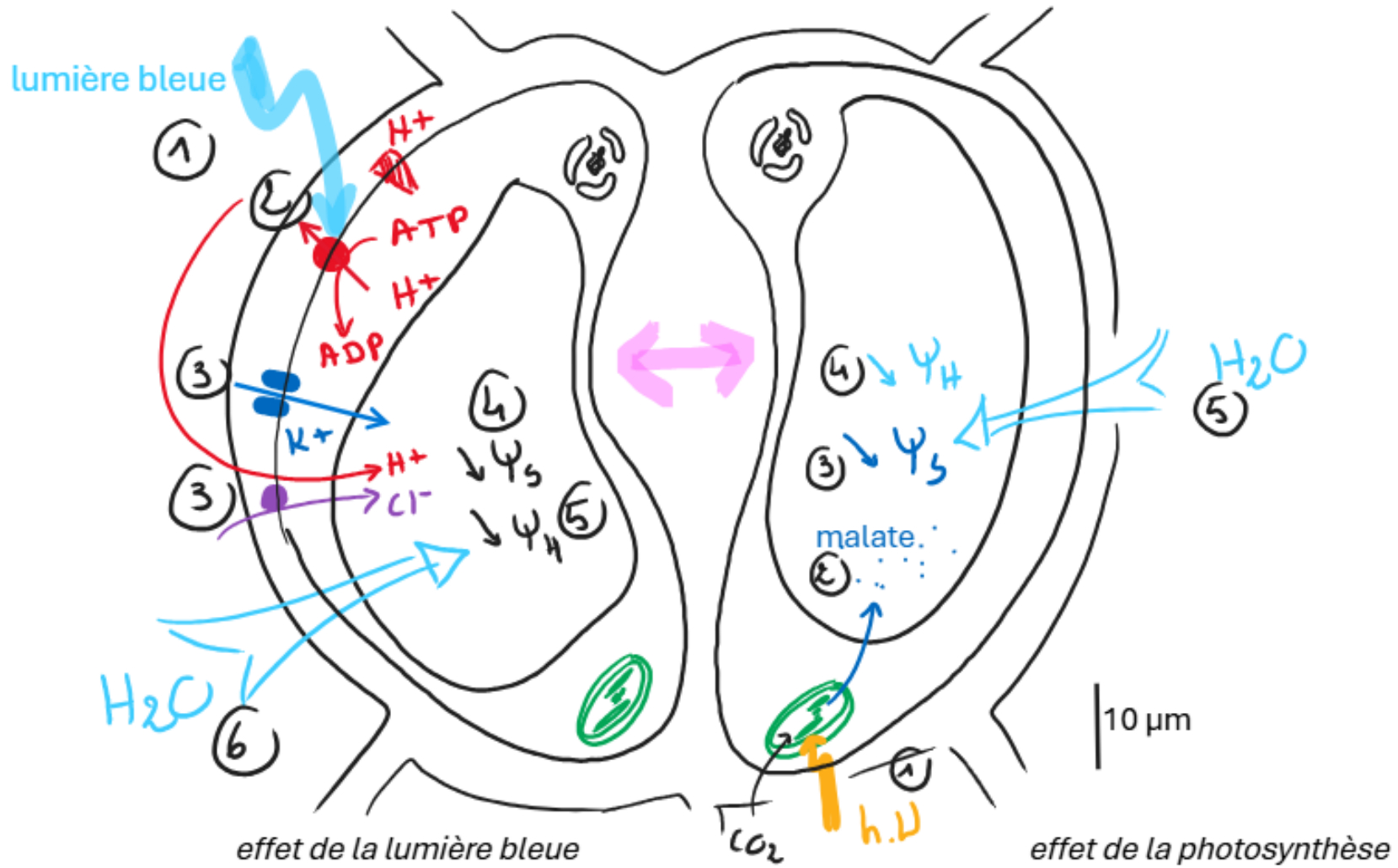
Mécanisme passif



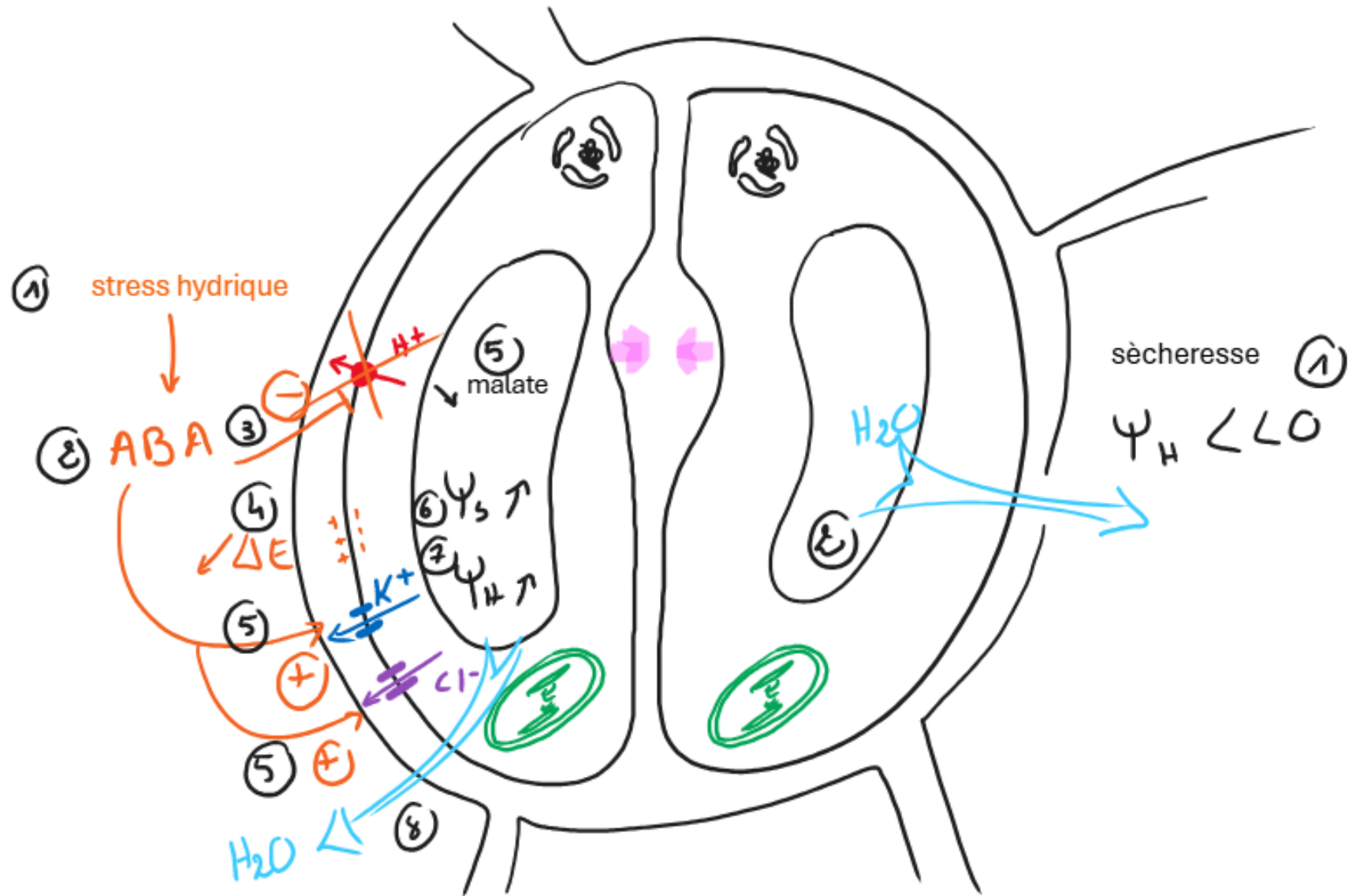
**Les mécanismes de contrôle de fermeture des stomates**



**Les mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates**



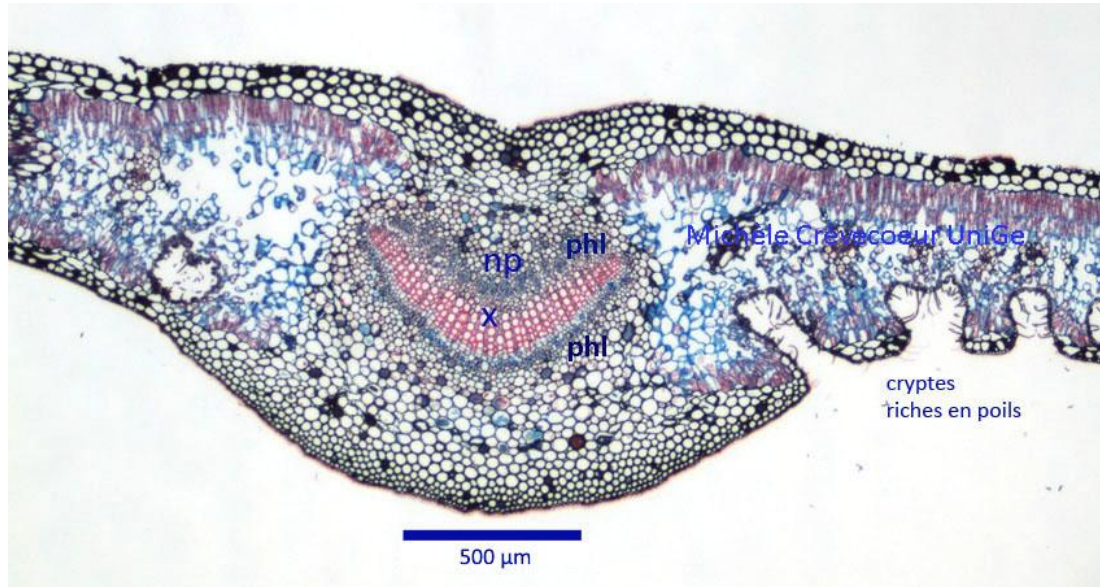
**Les mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates**



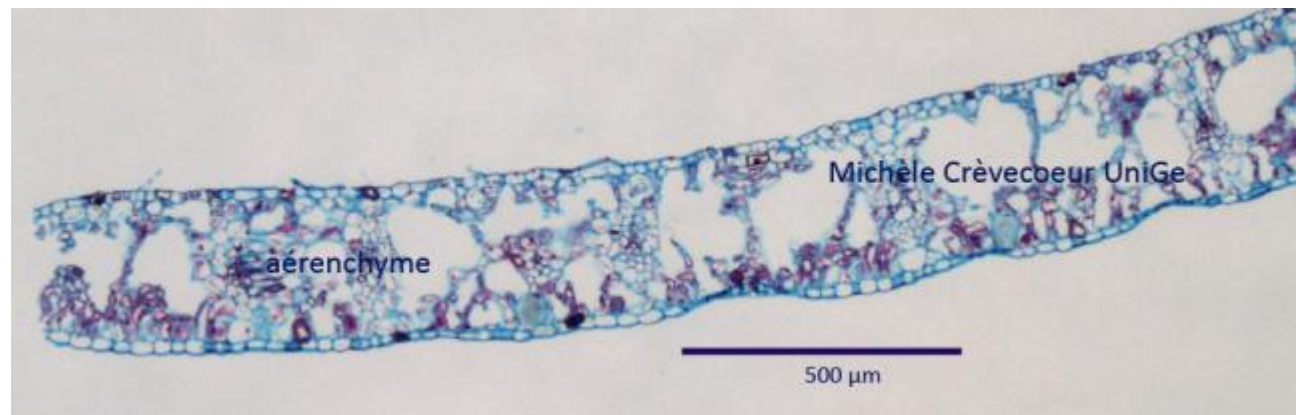
**Les mécanismes de contrôle de fermeture des stomates**

# A. LES STOMATES : CONTROLE DES FLUX HYDRIQUES

## 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates



coupe paraffine transversale dans une feuille de Laurier rose - *Nerium oleander*



coupe transversale dans une feuille de *Typhonodorum lindleyanum* (Monocotylédone)

Stomates: 2 cellules de garde qui sont les seules cellules **chlorophylliennes** de l'épiderme => adaptation à la fonction d'échanges car **photosynthèse** participe à ouverture des stomates (cf photosynthétats)

Stomates: échanges gazeux => lien avec port de la feuille

Majoritairement sur face abaxiale chez Eudicotylédones

Stomates: densité stomatique =  $f([ppCO_2])$  (densité  $\searrow$  quand  $[ppCO_2] \nearrow$ )



## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# B. LA FEUILLE, LIEU DE LA PHOTOSYNTHESE



## I. Flux de $\text{CO}_2$ et d' $\text{O}_2$ à travers les stomates

- **Deux sources de  $\text{CO}_2$  et d' $\text{O}_2$** 
  - $\text{CO}_2$  entrée dans limbe foliaire par les **stomates car concentration intrafoliaire < concentration dans atmosphère**
  - $\text{CO}_2$  issu de la respiration mitochondriale utilisée pour photosynthèse.
  - $\text{O}_2$  = **déchet de la photosynthèse** ⇒ sortie par orifices stomatiques + **utilisation par la respiration mitochondriale.**
- échanges de gaz respiratoires ⇒ **photosynthèse nette et brute :**
  - **photosynthèse brute = quantité de dioxygène produite** par la photosynthèse
  - **photosynthèse nette :  $\text{PSN} = \text{PSB} - \text{R}$** 
    - ✓  **$\text{PSN} < 0$  la nuit**
    - ✓  **$\text{PSN} > 0$  le jour**

# B. LA FEUILLE, LIEU DE LA PHOTOSYNTHESE

## I. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates

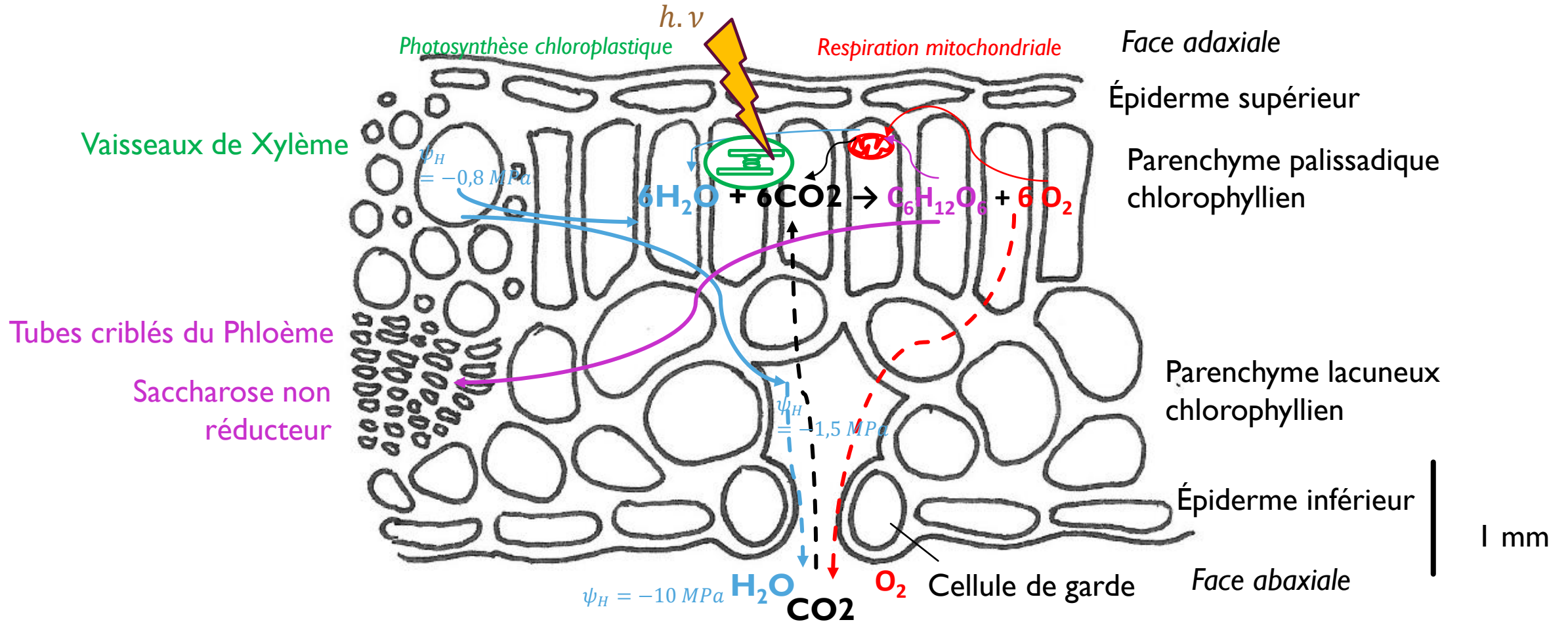


Figure 31 : échanges gazeux au sein du limbe foliaire

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme

### **C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme**

- 1. composition de la sève brute
- 2. Structure du xylème
- 3. La poussée racinaire
- 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# B. LA FEUILLE, LIEU DE LA PHOTOSYNTHESE

## 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

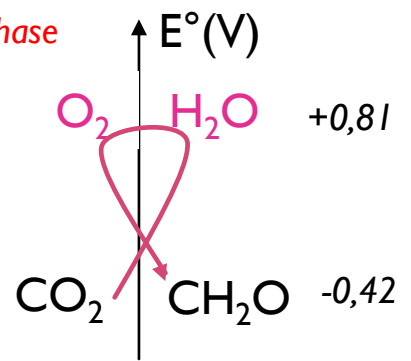
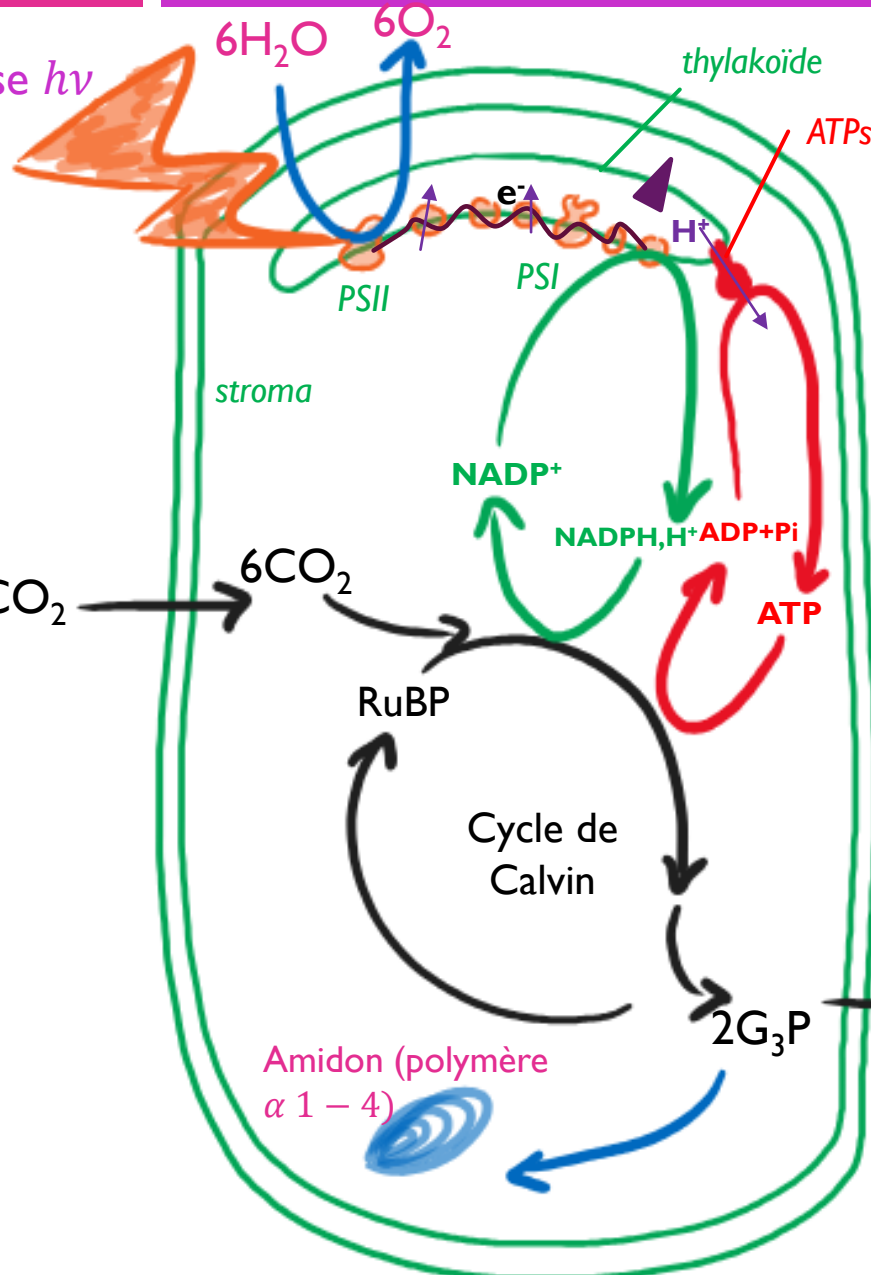
Cf SV-D-2-2

Jour → Énergie lumineuse  $h\nu$

Phase photochimique: réactions membranaires et synthèse d'intermédiaires (ATP et coenzymes réduits)

Ouverture des tomates →  $6\text{CO}_2$

Phase non photochimique: utilisation des intermédiaires (ATP et coenzymes réduits) pour la synthèse des oses



$$\Delta G^\circ = - nF\Delta E$$

$$\text{Soit } \Delta G^\circ = - 4.96500. (-0,42 - 0,81) = 475 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta G^\circ > 0$$

Réaction endergonique

Glucose + fructose → saccharose

Sève élaborée vers les organes puits (nuit)

# B. LA FEUILLE, LIEU DE LA PHOTOSYNTHESE

Cf SV-E

## 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

- 1 **Couplage** entre absorption d'énergie lumineuse et réalisation d'une oxydoréduction non spontanée ( $\text{H}_2\text{O} + \text{NADP}^+ \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{NADPH, H}^+$ ).
- 2 **Couplage** entre des oxydoréductions intermédiaires spontanées et l'établissement d'un **gradient de protons** entre le stroma et le lumen des thylakoïdes
- 3 **Couplage** entre dissipation de ce même gradient de proton et **synthèse d'ATP via l'ATP synthase** enchâssée dans la membrane des thylakoïdes.
- 4 Ces 3 couplages correspondent à la **phase photochimique** de la photosynthèse et forment des **intermédiaires réactionnels** riches en énergie.
- 5 **Couplage** entre **déphosphorylation de l'ATP** et réalisation d'une **réaction redox non spontanée** ( $\text{CO}_2 + \text{NADPH, H}^+ \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{NADP}^+$ ) : **cycle de Calvin** formant des molécules organiques (G3P: Glycéraldéhyde -3-P).
- 6 Les produits de la photosynthèse peuvent être **utilisés directement par la cellule** qui les a formés (pour la construction d'autres molécules comme la cellulose de la paroi, ou pour la formation d'ATP nécessaire à la réalisation de travaux cellulaires grâce à la respiration), mais également **être exportés** vers d'autres parties de la plante.

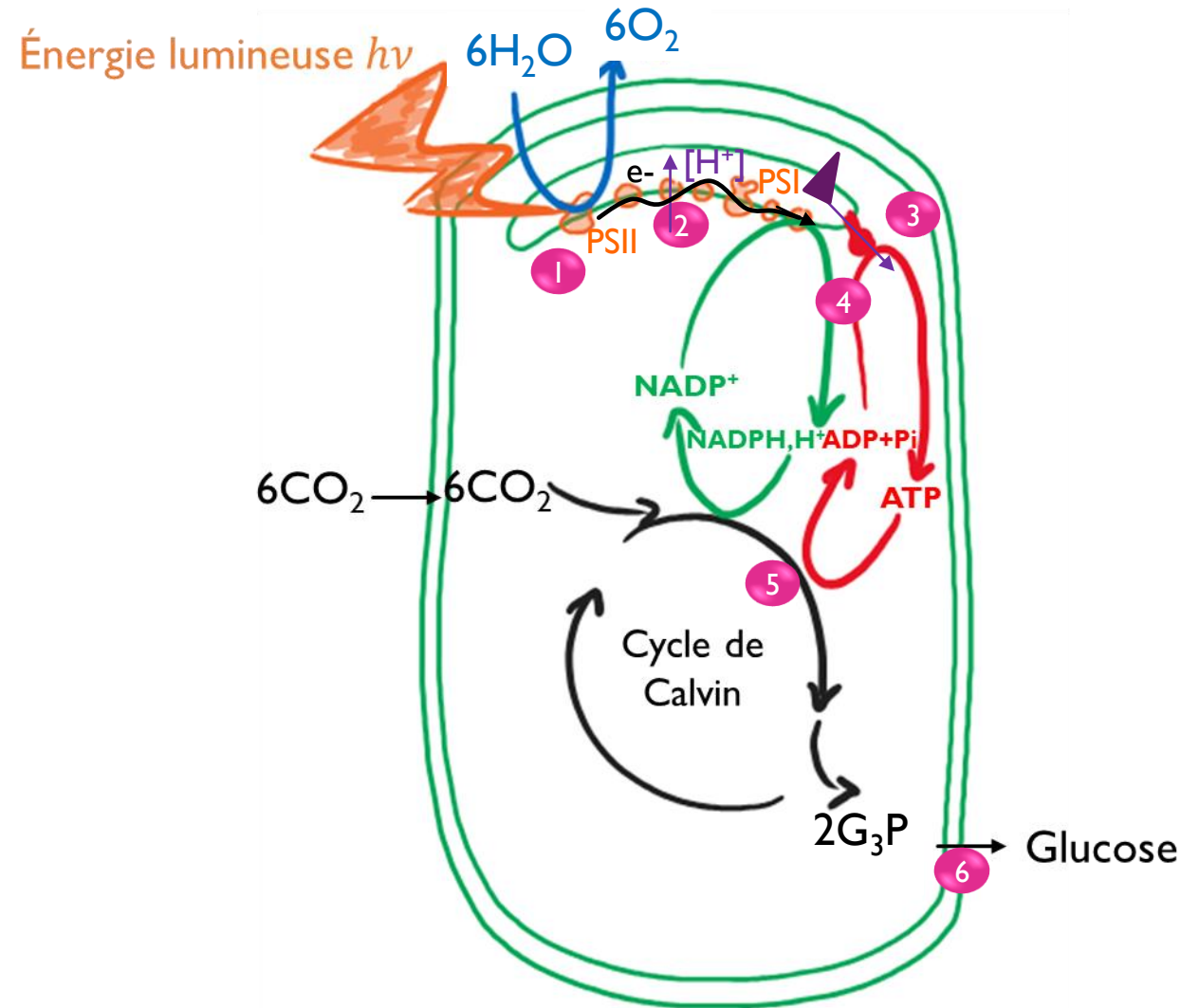


Figure 32 : formation d'oses au cours de la photosynthèse

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

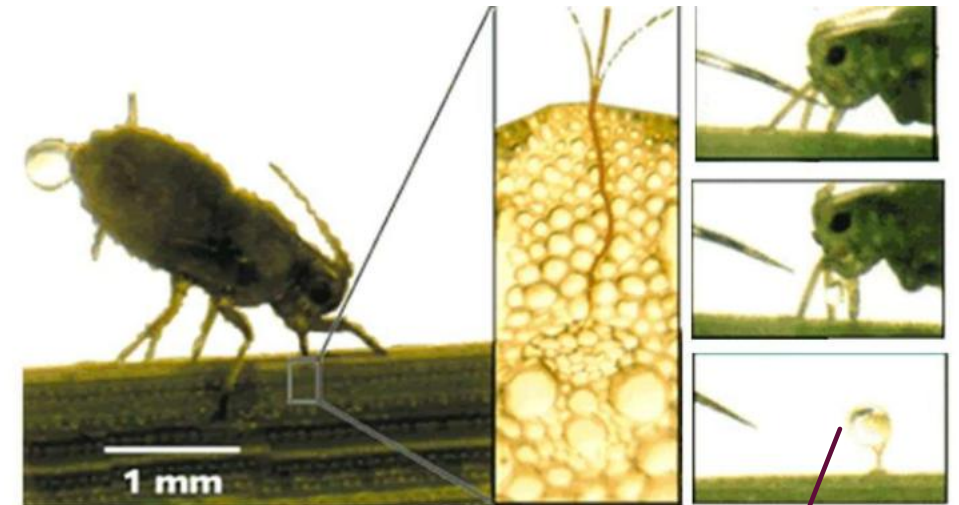
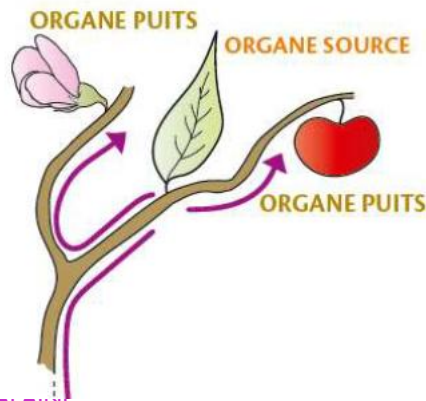
### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

### III. DISTRIBUTION DES PHOTOSYNTHÉTATS DANS L'ORGANISME

#### A. STRUCTURE DU PHLOÈME, RESEAU DE CONDUCTION DE LA SEVE ELABOREE

- cellules **non photosynthétiques** = **hétérotrophes**  $\Rightarrow$  **flux de matière organique** au sein de l'organisme végétal.
- sève élaborée
  - **eau, ions minéraux, molécules organiques (acides aminés, saccharose, hormone)**  $\Rightarrow \psi_S \ll 0 \Rightarrow \psi_H \ll 0 \Rightarrow$  entrée d'eau dans les tubes criblés
  - solution alcaline (pH 7,5-8,5) concentrée
  - Viscosité importante (300g/L)  $\Rightarrow$  **grande résistance à l'écoulement** (Poiseuille)  $\Rightarrow$  petit débit : **1m/h**



Perle  $\Rightarrow$  circulation sous pression

Analyse de la composition de la sève élaborée par rupture du stylet de puceron au laser (microdrain)

# III. DISTRIBUTION DES PHOTOSYNTHÉTATS DANS L'ORGANISME

## A. STRUCTURE DU PHLOÈME, RESEAU DE CONDUCTION DE LA SEVE ELABOREE

- **phloème** de la **sève élaborée** des **organes sources** vers organes puits
  - **phloème primaire**, présent chez toutes les angiospermes,
  - **phloème secondaire** uniquement chez les **espèces dicotylédones**.
- **Éléments du phloème:**
  - **éléments conducteurs** = **tubes criblés** = **cellules vivantes** à paroi pectocellulosique non lignifiées, en communication via des pores appelés **cribles**, (pas de noyau et peu d'organites) 15 à 60µm large ⇒ grande résistance (Poiseuille) donc petit débit
  - **cellules compagnes** associées par des plasmodesmes (nutrition des cellules criblées et charge du phloème)
  - **cellules parenchymateuses, fibres**

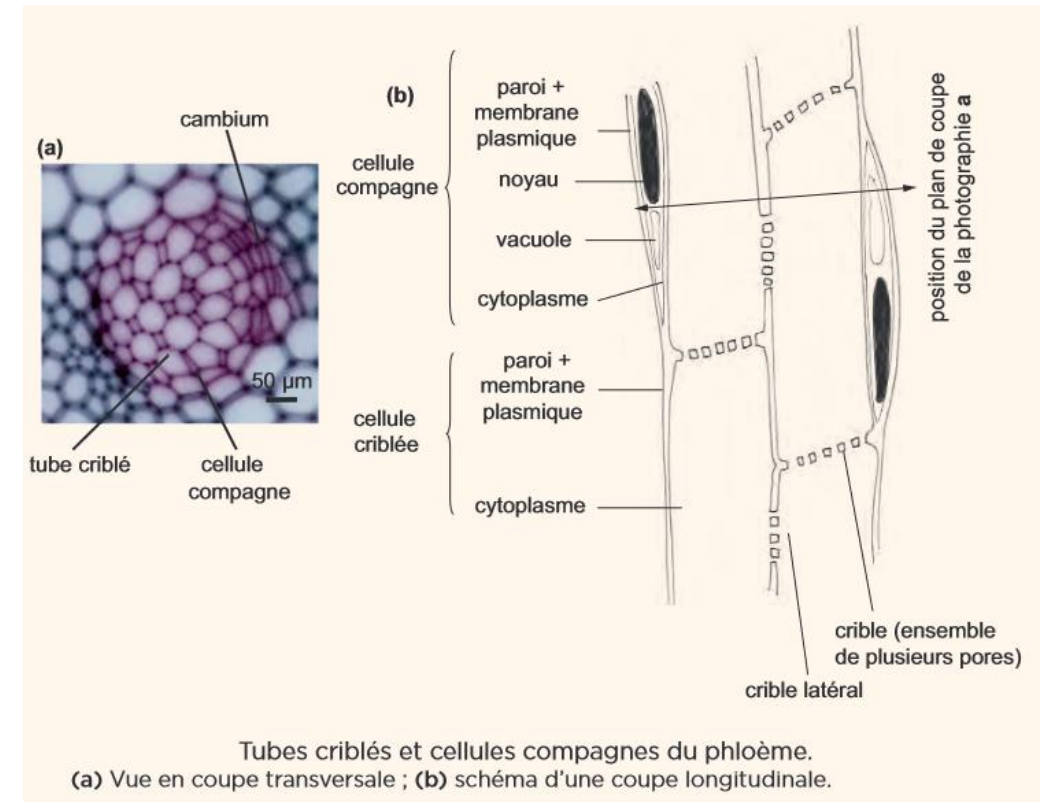
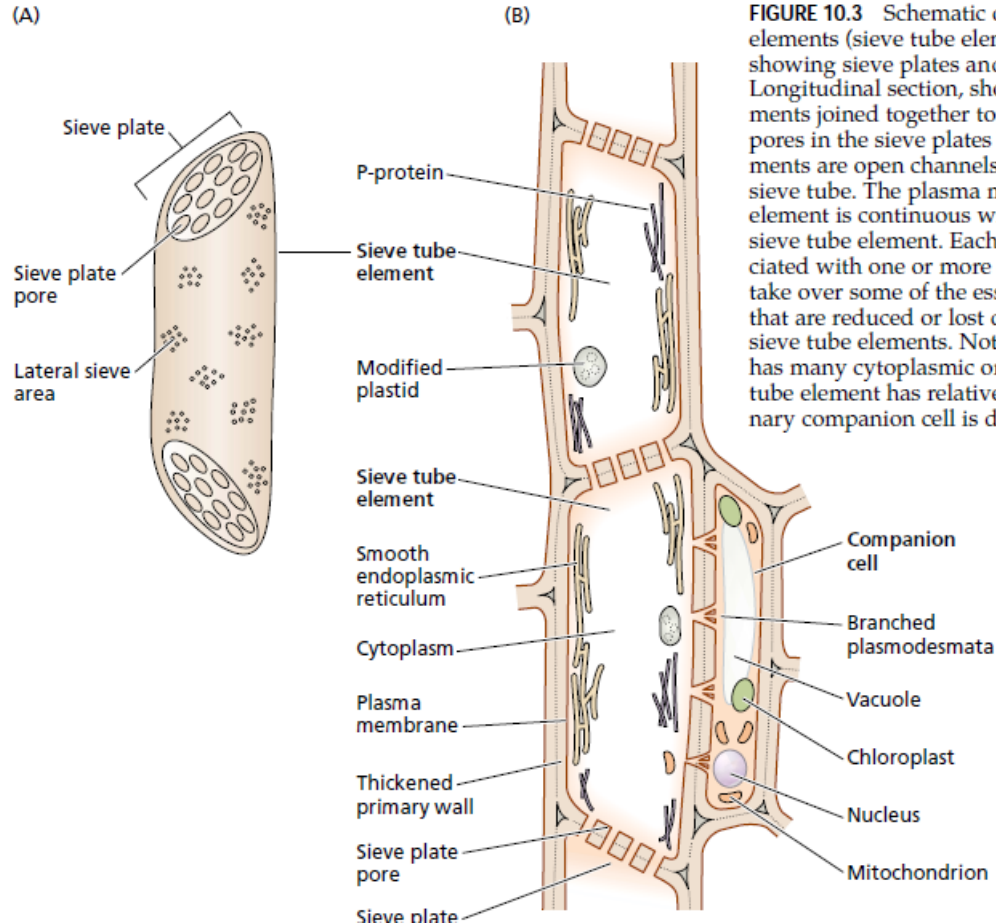


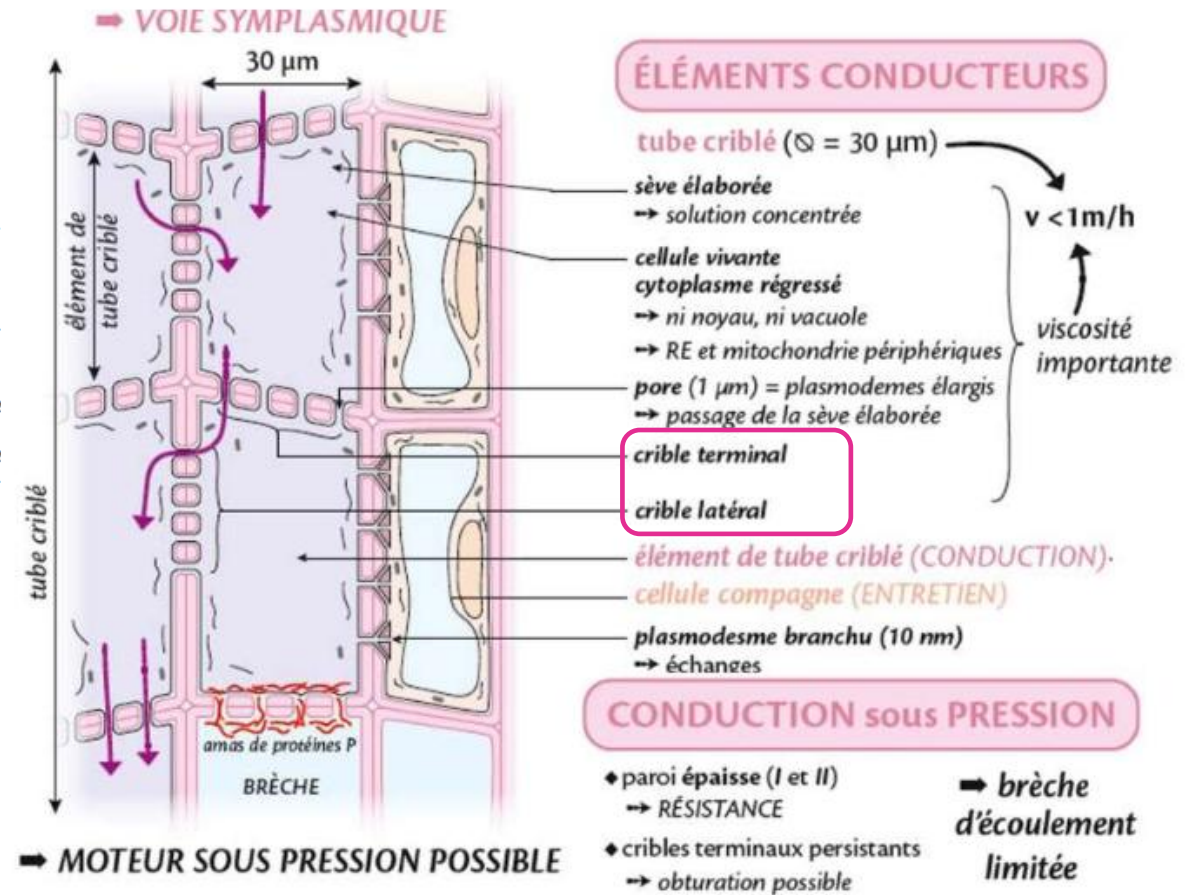
Figure: tubes criblés et cellules compagnes du phloème  
Source: BCPST I J'intègre Dunod

# III. DISTRIBUTION DES PHOTOSYNTHÉTATS DANS L'ORGANISME

## A. STRUCTURE DU PHLOÈME, RESEAU DE CONDUCTION DE LA SEVE ELABOREE



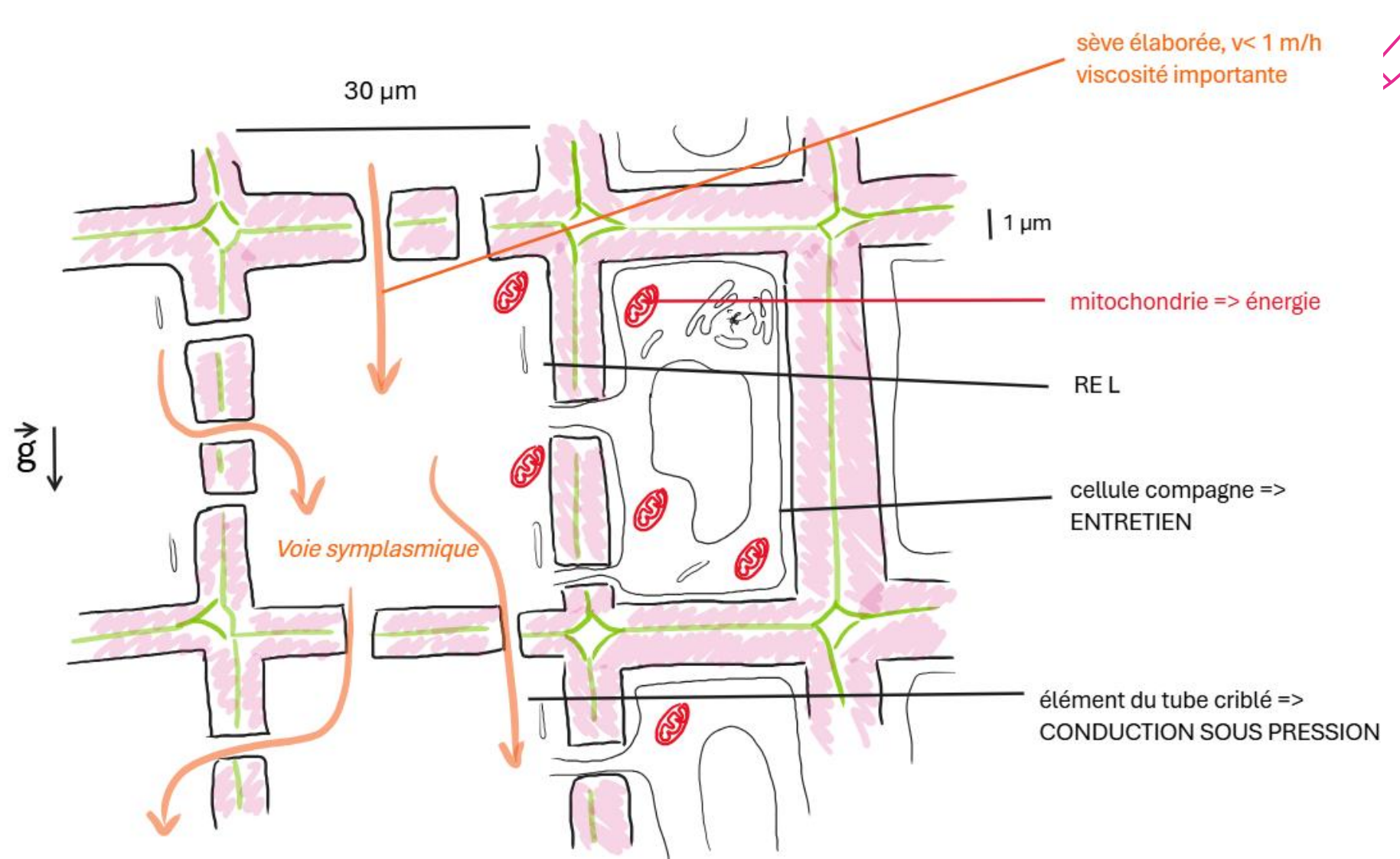
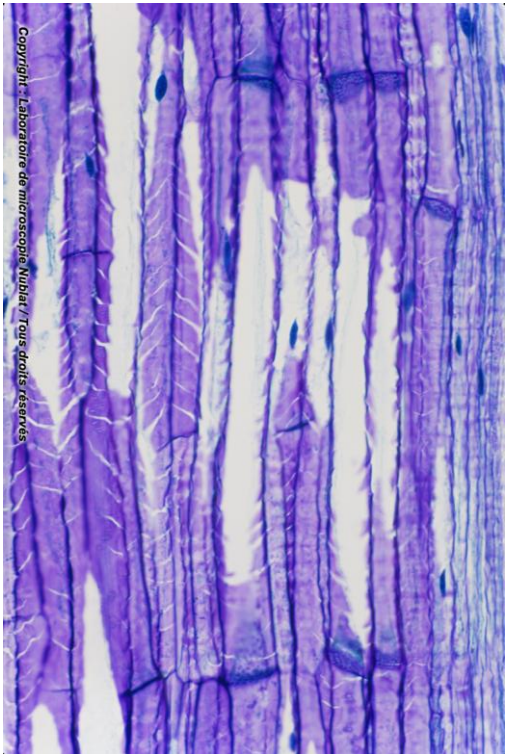
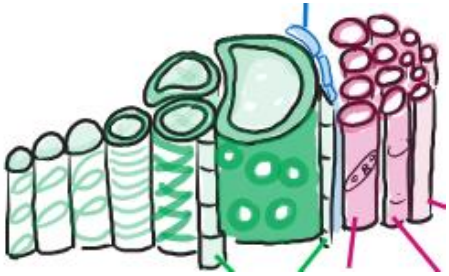
**FIGURE 10.3** Schematic drawings of mature sieve elements (sieve tube elements). (A) External view, showing sieve plates and lateral sieve areas. (B) Longitudinal section, showing two sieve tube elements joined together to form a sieve tube. The pores in the sieve plates between the sieve tube elements are open channels for transport through the sieve tube. The plasma membrane of a sieve tube element is continuous with that of its neighboring sieve tube element. Each sieve tube element is associated with one or more companion cells, which take over some of the essential metabolic functions that are reduced or lost during differentiation of the sieve tube elements. Note that the companion cell has many cytoplasmic organelles, whereas the sieve tube element has relatively few organelles. An ordinary companion cell is depicted here.



D'après Aurélie Denis

### III. DISTRIBUTION DES PHOTOSYNTHÉTATS DANS L'ORGANISME

#### A. STRUCTURE DU PHLOÈME, RESEAU DE CONDUCTION DE LA SEVE ELABOREE



Copyright: Nublat

Figure 34 : les tubes criblés du phloème assurent une conduction de sève élaborée sous pression

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# B. UN TRANSPORT DE LA SEVE ELABOREE DES ORGANES SOURCE VERS LES ORGANES PUIITS

## I. Les feuilles : des organes source



- **feuille organe photosynthétique :**
  - synthétise le jour de la matière organique
  - exporte **vers des organes puits** ou stocke sous forme d'**amidon** dans ses cellules (elle l'hydrolysera et l'utilisera la nuit en l'absence de photosynthèse).
- **saccharose chargé activement dans le tube criblé par sa cellule compagne**
  - ⇒ attire l'eau du xylème voisin par effet d'osmose et provoque sa mise sous pression.
  - ⇒ Intensité de décharge dépend de l'utilisation cellulaire
- La répartition de la sève élaboré **écoulement de masse** des grandes pressions aux faibles pressions vers les organes puits situés en haut (ex fleurs fruits bourgeons) ou en bas (racine) du végétal

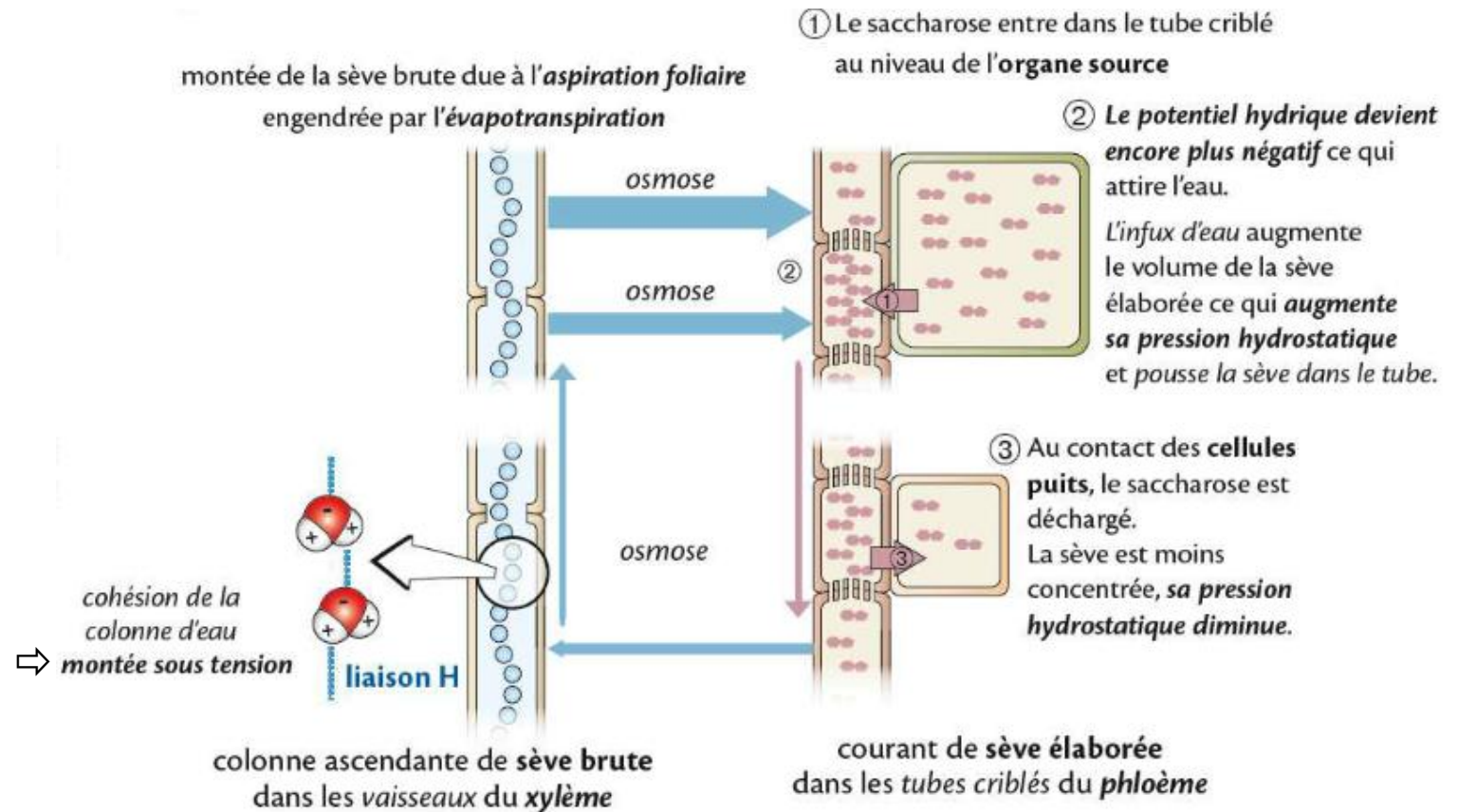


Figure 35 : des organes sources aux organes puits, une charge active du phloème induisant des flux hydriques entre xylème et phloème (source Aurélie Denis)

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

## B. UN TRANSPORT DE LA SEVE ELABOREE DES ORGANES SOURCE VERS LES ORGANES PUIITS

### 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage



- **angiospermes biannuelles** ou **vivaces** ⇨ **organes de réserve** :

- **rhizomes** issus de racines,
- **tubercules** issus de tiges,
- **bulbes** issus de feuilles ...

- organe source ou puits de façon **périodique** :

- A la belle saison (printemps/été), les photosynthétats sont transportés des organes photosynthétiques vers les puits de stockage.
- En hiver, les flux sont inexistantes ou très ralentis (perte des feuilles ou métabolisme très ralenti).
- Au début du printemps suivant, les organes de réserve hydrolysent leurs réserves et exportent la matière organique vers les organes qui en ont besoin (bourgeons par exemple).

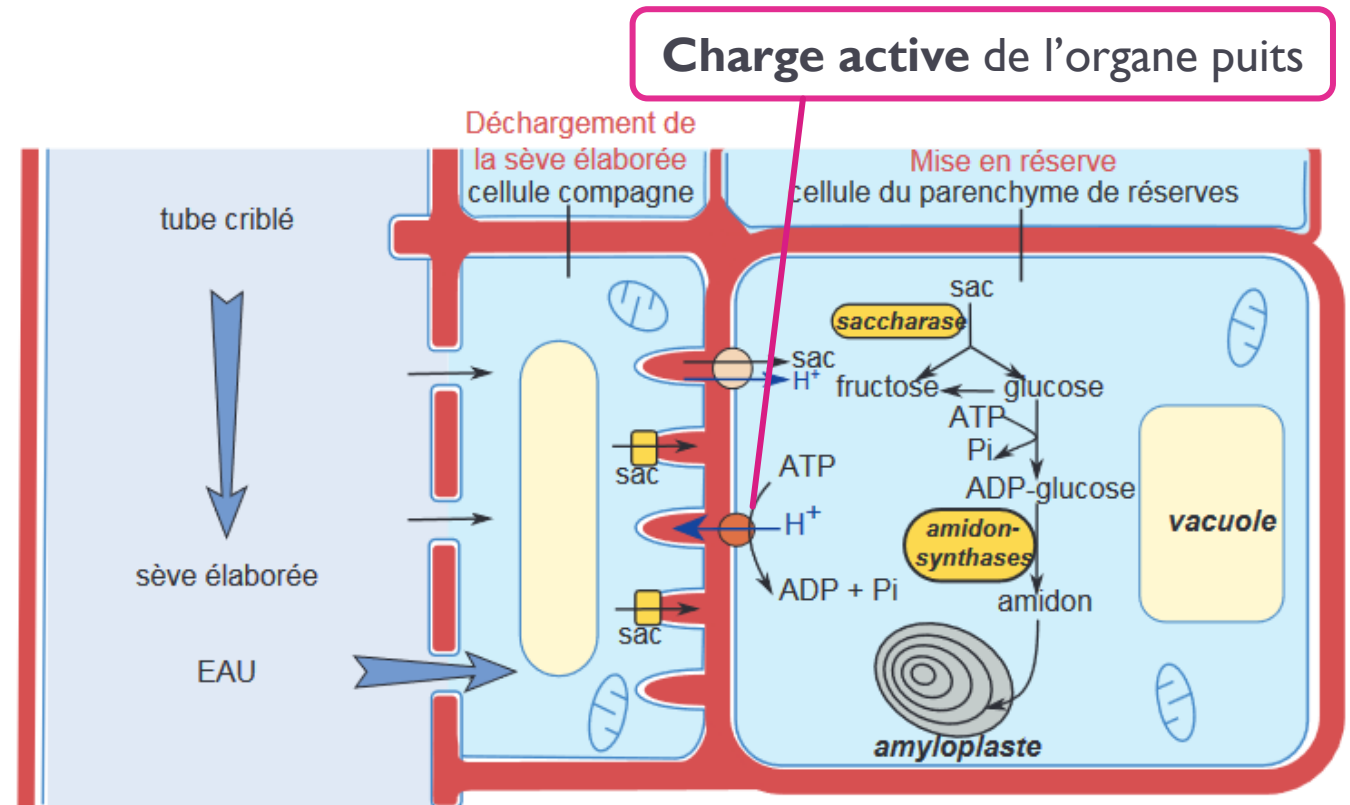


Figure 36 : mise en réserve dans un **parenchyme amylofère** racinaire (Dunod, j'intègre, ed. 2021)

## B. UN TRANSPORT DE LA SEVE ELABOREE DES ORGANES SOURCE VERS LES ORGANES PUIITS

### 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage



	Transpiration foliaire	Moteur sève brute	Stockage foliaire des assimilats	Exportation des assimilats (sève élaborée)
<b>Jour</b>	Élevée	Transpiration foliaire	Saccharose (cytosol) Amidon (chloroplaste)	Croissante ; élevée
<b>Nuit</b>	Faible	Poussée racinaire	Pas de stockage ; hydrolyse	Décroissante mais jamais nulle

Figure 37 : Variations quotidiennes des corrélations trophiques chez la pomme de terre (Dunod, J'intègre, ed. 2021)

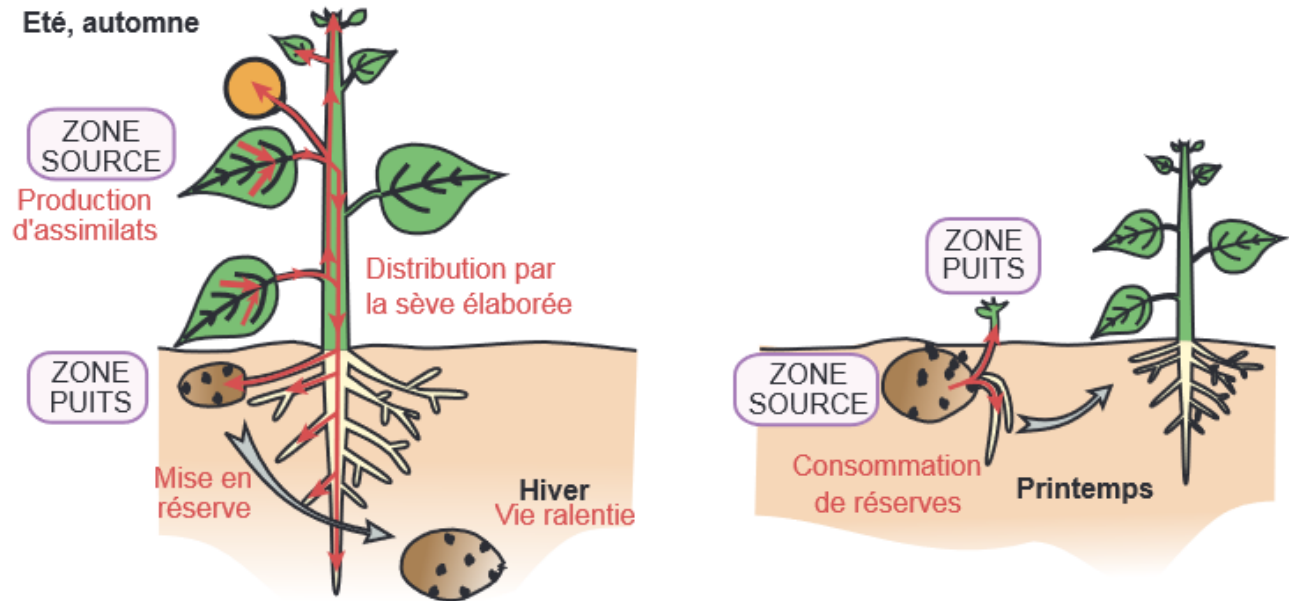


Figure 38 : Variations saisonnières des corrélations trophiques chez la pomme de terre (Dunod, J'intègre, ed. 2021)

### 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage

#### ■ fonctionnement cellulaire périodique :

➤ Au printemps et en été, **saccharose** hydrolysé en glucose + fructose → fructose isomérisé en glucose → activé en ADP-glucose → polymérisation en amidon stocké dans des amyloplastés

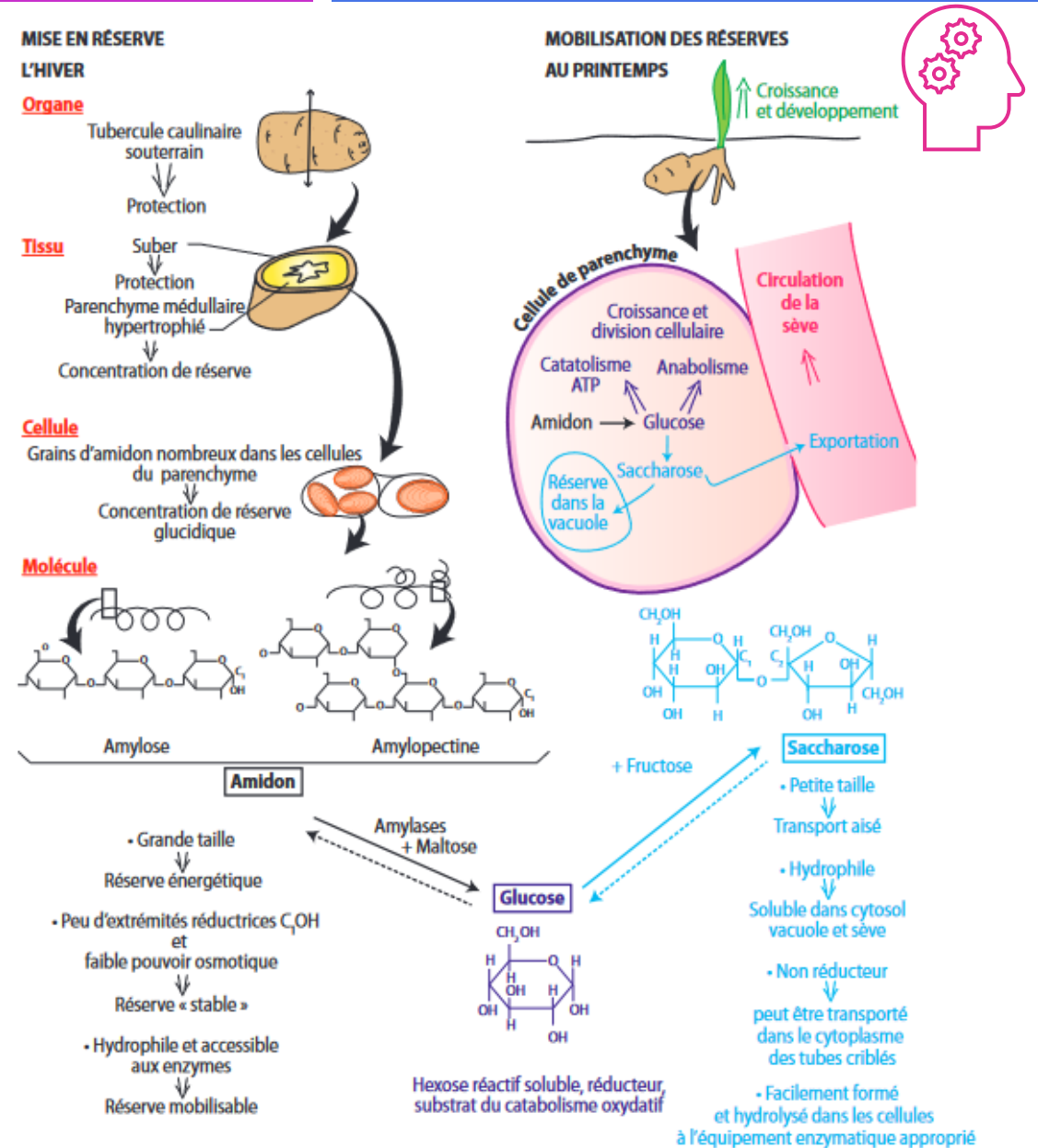
❖ **amidon compact et peu osmotiquement actif** ⇒ **stable et ne modifie pas la pression osmotique** au sein de la cellule → **bonne forme de stockage.**

➤ reprise de la photosynthèse à l'année suivante: réserves d'amidon hydrolysées en glucose → **saccharose** → **exporté** vers les organes source.

■ La synthèse des enzymes de stockage (**amylosynthétase**) et de déstockage (**amylase**) de l'amidon sous le contrôle de facteurs environnementaux: T°C → **phytohormones** → fonctionnement périodique **synchronisé aux saisons.**

■ Les flux de matière organique au sein de la sève élaborée des organes sources aux organes puits dépendent de :

- distance entre ces organes : les organes puits les plus proches sont les mieux **approvisionnés**
- **L'intensité de leur métabolisme** : les organes puits à métabolisme élevés absorbent davantage les molécules organiques
- ⇒ compétition entre organes pour l'approvisionnement en sève élaborée.



## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

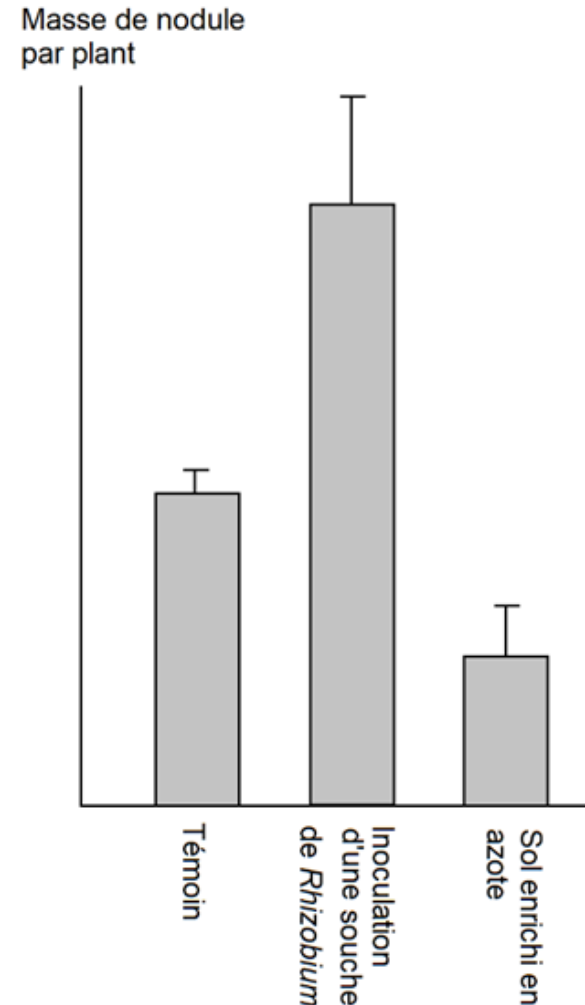
### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# C. LES NODOSITES CHEZ LES FABACEES : DES ORGANES PUIITS DE CONSOMMATION FOURNISSEURS D'AZOTE ORGANIQUE

## I. Mise en place de l'association symbiotique

- **nodosités des fabacées : symbiose entre Fabacée et bactéries fixatrices d'azote** du genre *Rhizobium*
  - à la fois **organe source** : exportation de la matière organique azotée
  - À la fois **organe puit** : consommation de la matière organique carbonée



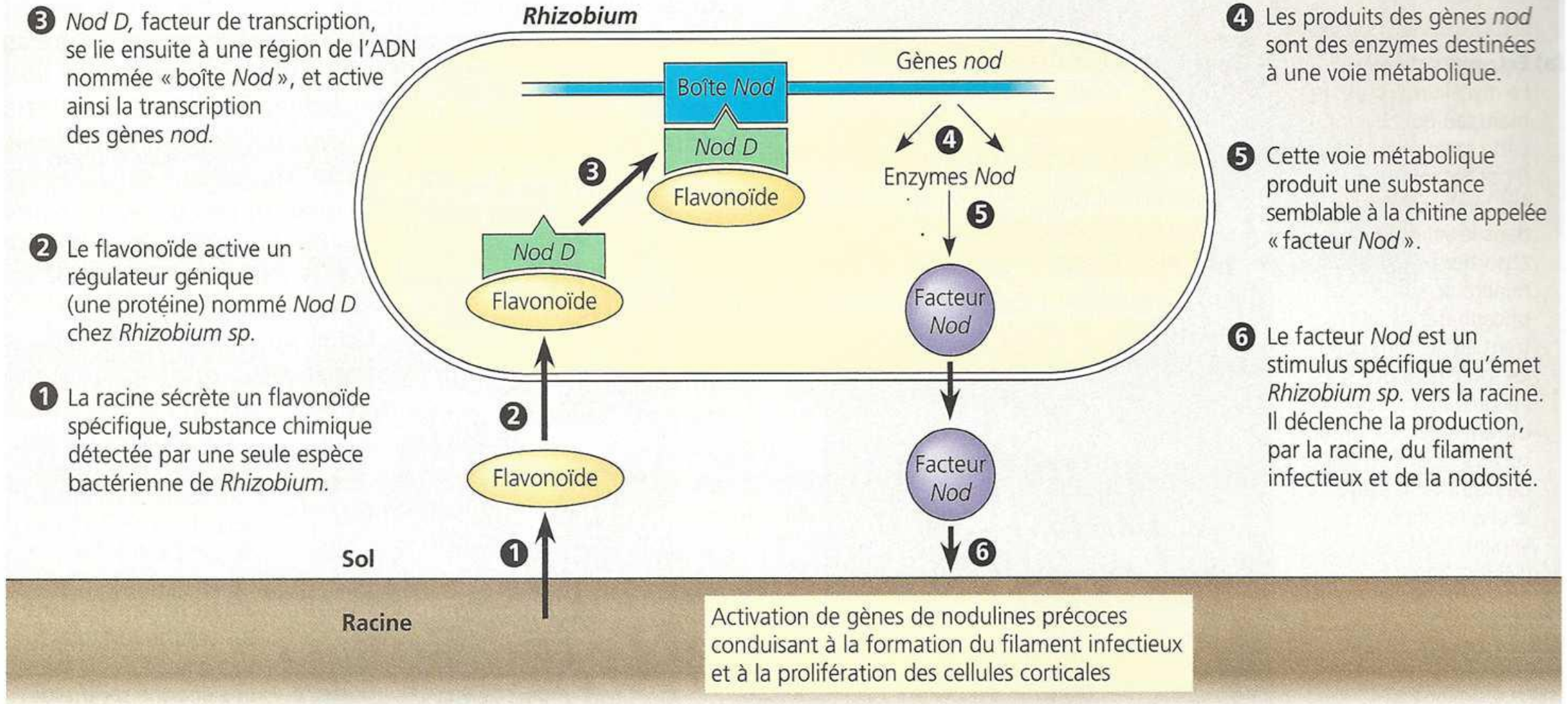


Figure 53 : Dialogues moléculaires entre Fabacée et *Rhizobium*

Mise en place de la symbiose entre l'appareil racinaire et *Rhizobium* qui vit librement dans le sol = **nodulation** (= ensemble des processus qui permettent l'édification de la nodosité).

## PLAN DU COURS

### **I. L'absorption de la solution hydrominérale du sol est réalisée par les racines**

- A. La racine, lieu d'absorption de l'eau et des ions
  - 1. Le sol, lieu de prélèvement de l'eau et des ions
  - 2. La zone pilifère, une surface d'échange entre la plante et le sol
  - 3. Les mycorhizes, une association symbiotique favorisant l'absorption de la solution du sol
- B. Modalités d'entrée de l'eau et des ions dans la racine
  - 1. Potentiel hydrique et flux hydrique
  - 2. Transporteurs membranaires et flux d'ions
  - 3. Voie symplasmique et apoplasmique et franchissement de l'endoderme
- C. Mécanismes de transport de la sève brute dans l'organisme
  - 1. composition de la sève brute
  - 2. Structure du xylème
  - 3. La poussée racinaire
  - 4. L'évapotranspiration foliaire

### **II. La feuille : photosynthèse et contrôle des flux hydriques**

- A. Les stomates : contrôle des flux hydriques
  - 1. Structure et dynamique d'ouverture des stomates
  - 2. Des mécanismes de contrôle de l'ouverture des stomates
- B. La feuille, lieu de la photosynthèse
  - 1. Flux de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>2</sub> à travers les stomates
  - 2. Cellules chlorophylliennes et photosynthèse

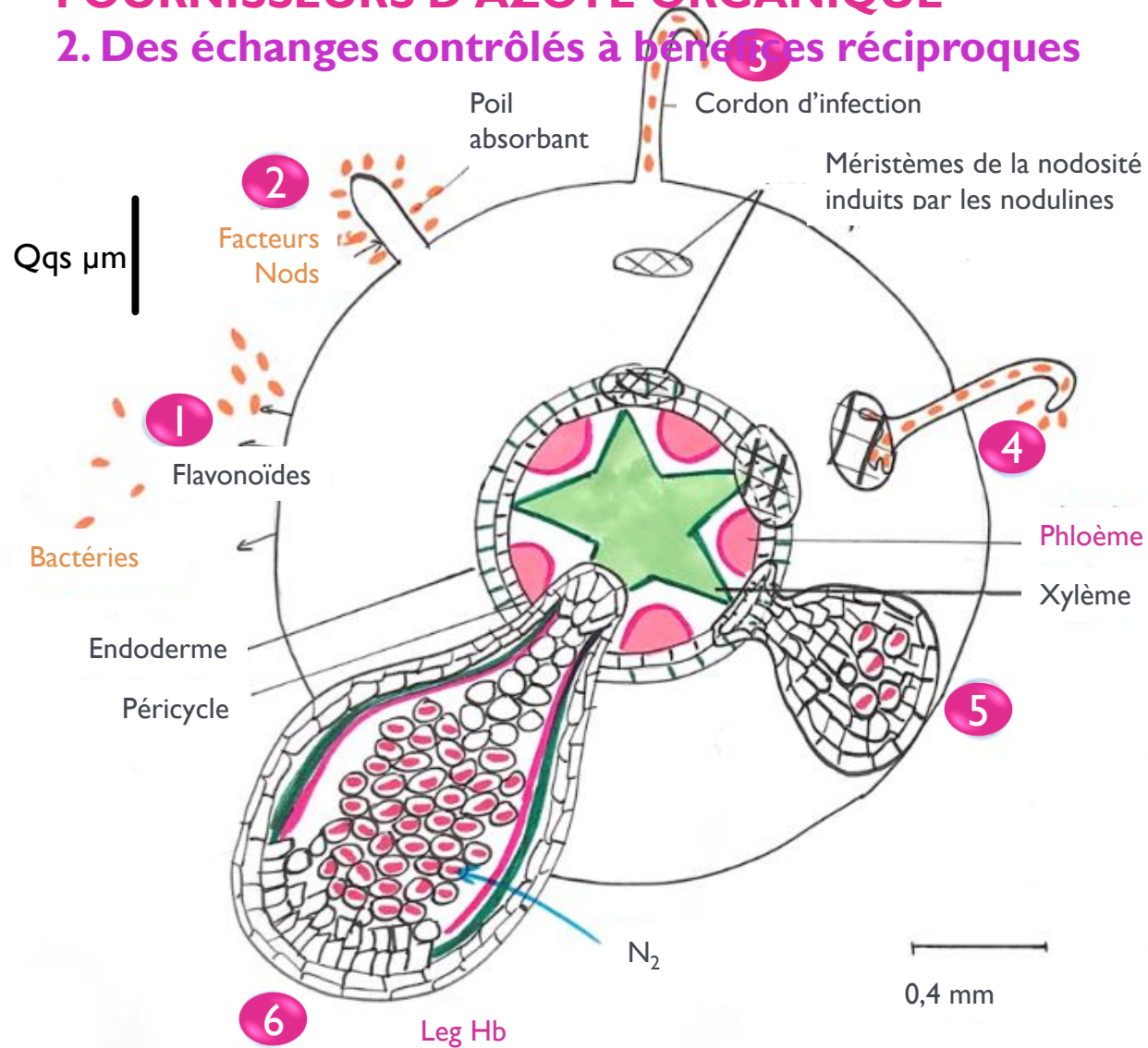
### **III. Distribution des photosynthétats dans l'organisme**

- A. Structure du phloème, réseau de conduction de la sève élaborée
- B. Un transport de la sève élaborée des organes source vers les organes puits
  - 1. Les feuilles : des organes source
  - 2. Les racines, les fleurs et les fruits : des organes puits de consommation
  - 3. Les organes de réserve : des organes source et puits de stockage
- C. Les nodosités chez les fabacées : des organes puits de consommation fournisseurs d'azote organique
  - 1. Mise en place de l'association symbiotique
  - 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

# C. LES NODOSITES CHEZ LES FABACEES : DES ORGANES PUIITS DE CONSOMMATION

## FOURNISSEURS D'AZOTE ORGANIQUE

### 2. Des échanges contrôlés à bénéfices réciproques

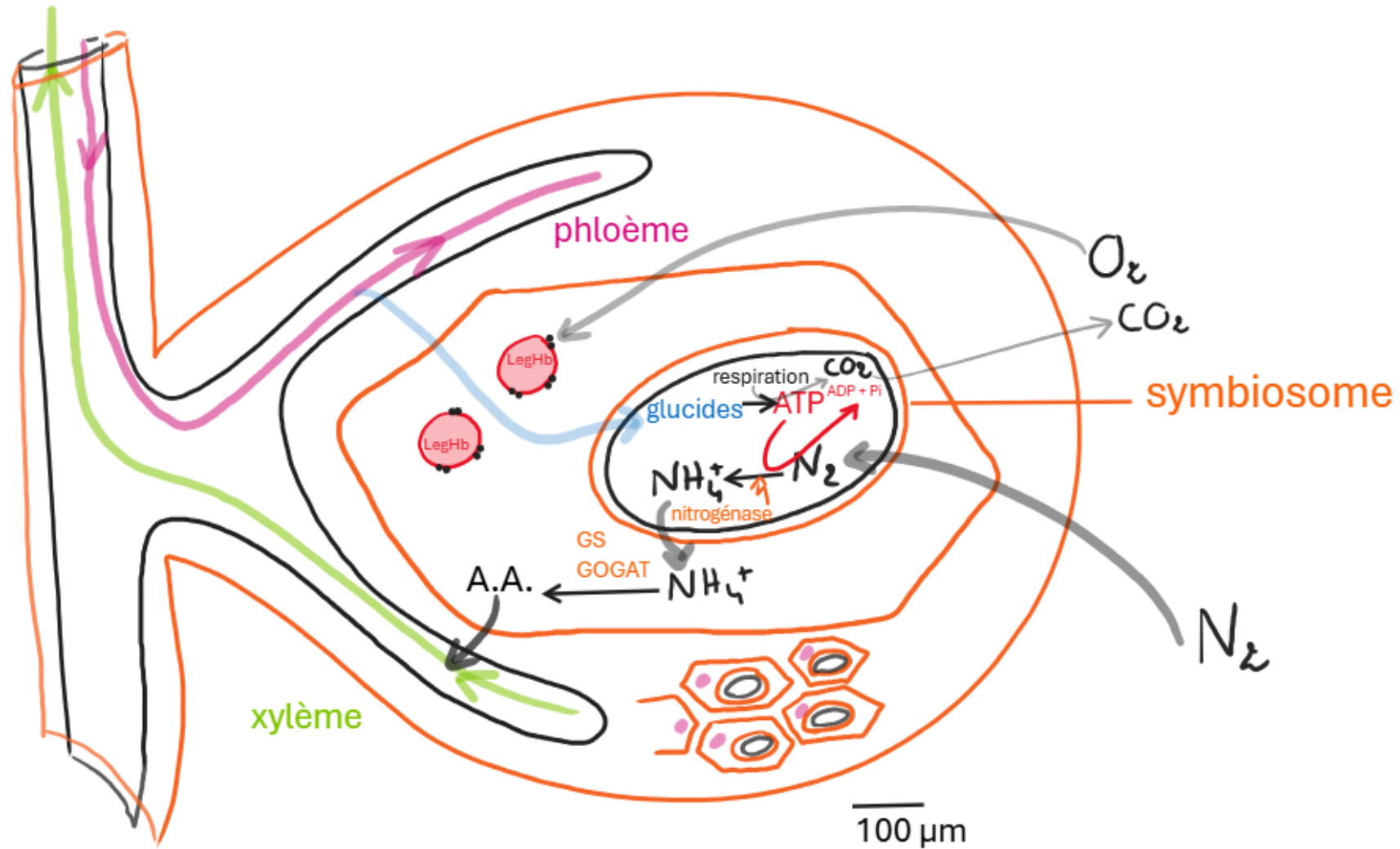


Les étapes de la nodulation, relation symbiotique entre les bactéries du genre *Rhizobium* et les angiospermes de la famille des Fabacées

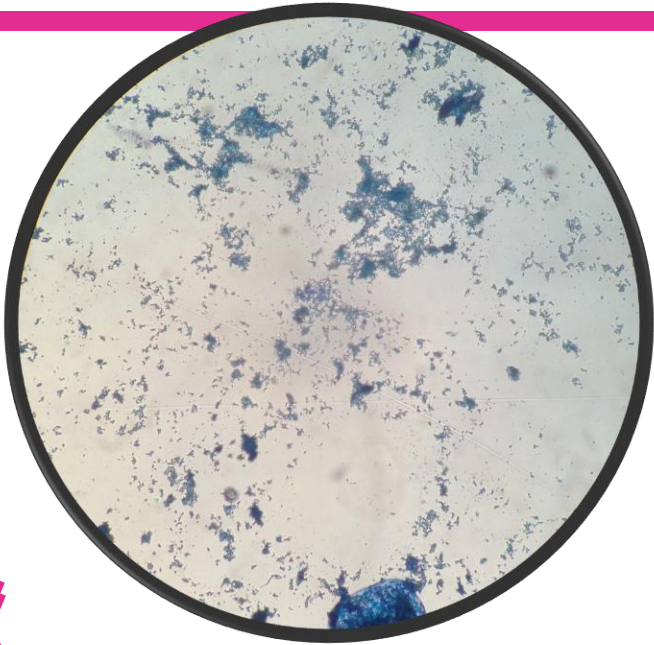
BCPST1 - ENCPB - S. DALAINE

- ① Attraction chimique des bactéries par sécrétion de flavonoïdes par la racine
- ② Adhésion et reconnaissance des espèces du genre *Rhizobium* avec l'espèce de Fabacée/ sécrétion de facteurs NOD par les bactéries
- ③ Mise en place d'un cordon d'infection suite à l'action des facteurs NOD/ multiplication au sein des méristèmes de la nodosité sous l'induction des facteurs NOD (nodulines)
- ④ Initialisation de la nodosité
- ⑤ Fusion des méristèmes de la nodosité, les bactéries changent de forme (bactéroïdes), synthèse de Leghémoglobine par les cellules racinaires hébergeant les bactéroïdes
- ⑥ Fixation du  $N_2$  atmosphérique par *Rhizobium* grâce à la nitrogénase, transfert de matières azotées à la plante et apport de photosynthétats à la bactérie (conduction assurée par xylème et phloème)

= dialogue moléculaire avec échanges de signaux entre les poils absorbants et les bactéries



La fixation du diazote atmosphérique par la bactérie *Rhizobium* de la nodosité d'une Fabacée

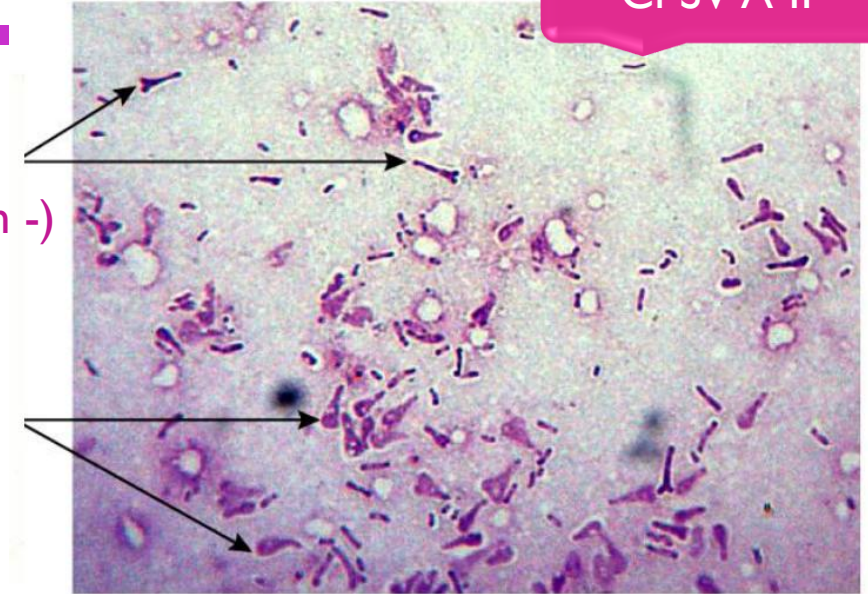


X600 + bleu de méthylène



Bactéroïdes  
(Rhizobium Gram -)

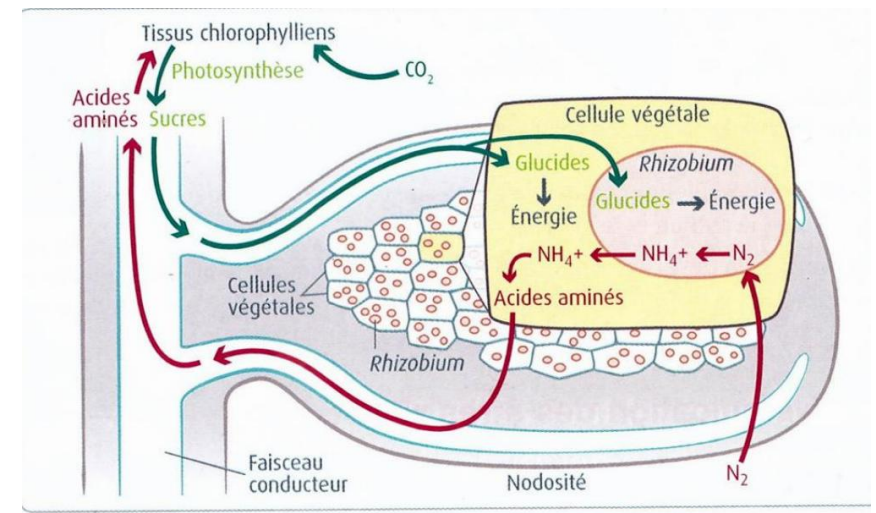
bactéroïdes

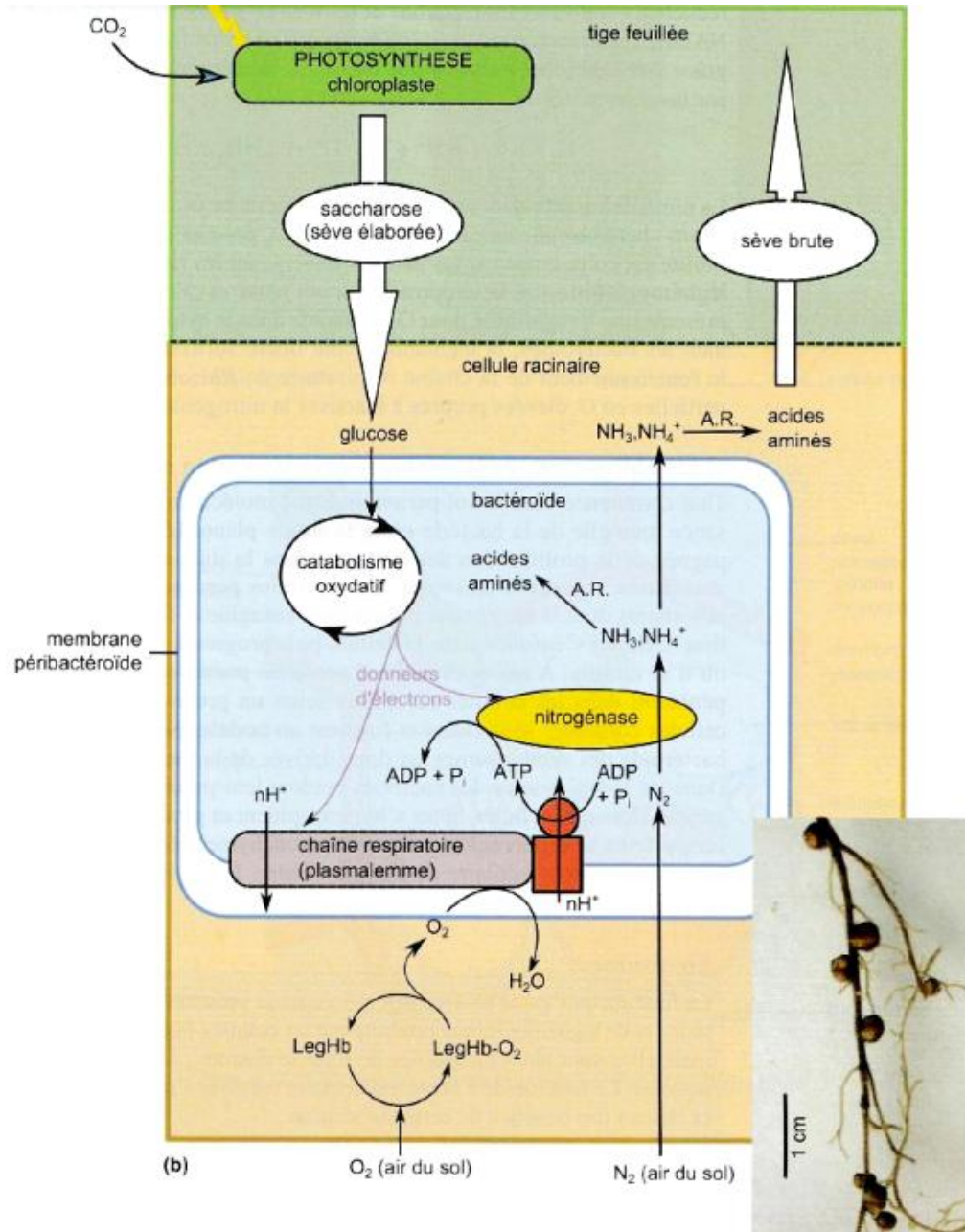


X1000 + huile à immersion + coloration Gram  
(Segarra et al. 2015)

10  $\mu$ m

- La plante apporte protection et énergie sous forme de photosynthétats (saccharose) aux bactéries
- Les bactéries fixent le  $N_2$  atmosphérique et le réduisent en  $NH_4^+$  directement incorporé par la cellule végétale racinaire en acides aminés  $\rightarrow$  la fabacée s'enrichit en protéines





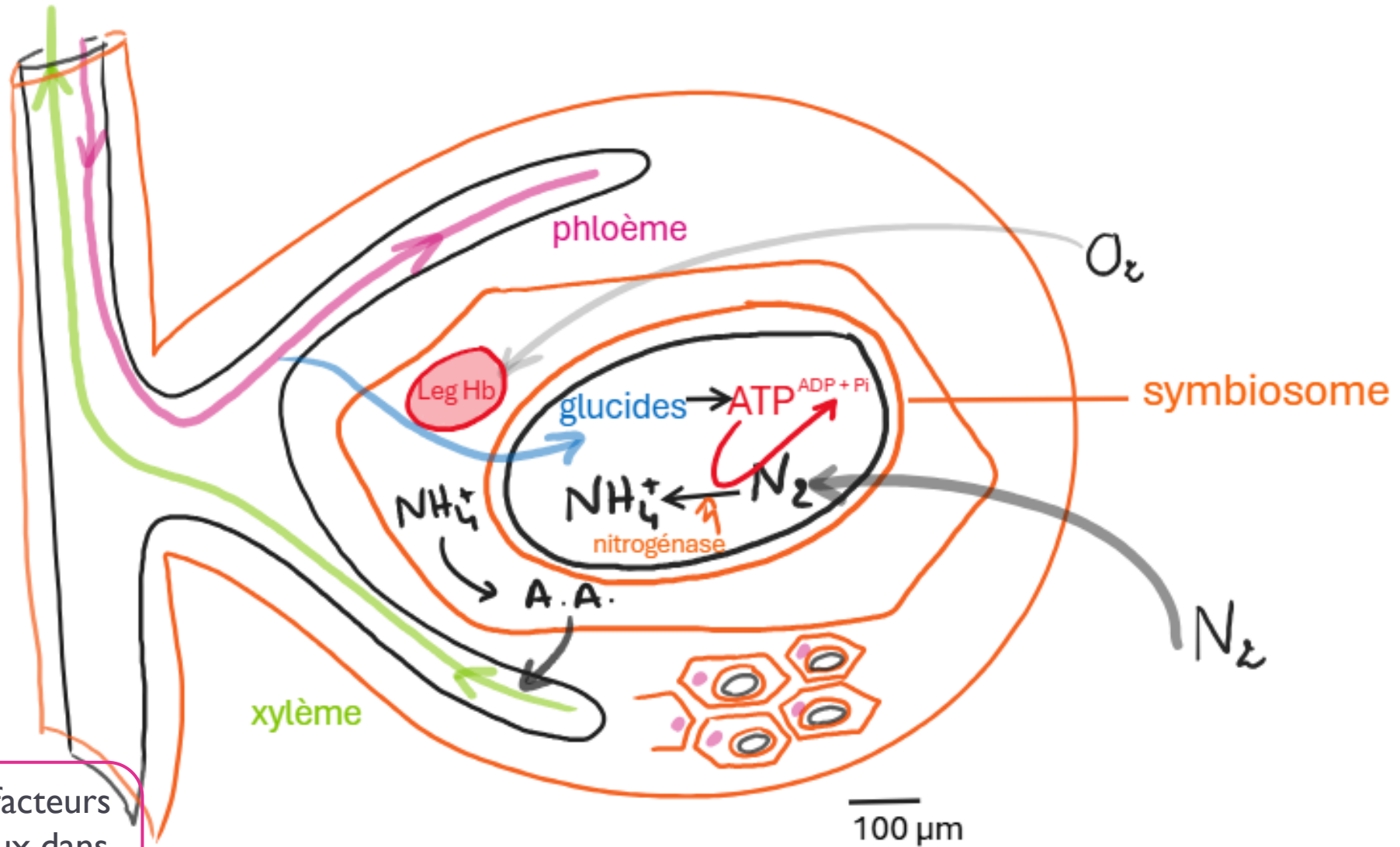
## Nitrogénase



Au pH cellulaire, l'ammoniac  $\text{NH}_3$  devient ammonium  $\text{NH}_4^+$ .  
 $\text{NH}_4^+$  acide faible  $\rightarrow$  rendue inerte par fixation sur acides aminés (dans chloroplastes) distribués aux plantes via la SB

La nitrogénase est rapidement inactivée en présence de  $\text{O}_2$ , or *Rhizobium* hétérotrophe au C nécessite  $\text{O}_2$  et saccharose de plante pour produire ATP à forte [ ] nécessaire à la réduction du  $\text{N}_2$ .

- $\Rightarrow$  Plante synthétise la legHb à forte affinité pour  $\text{O}_2$
- $\Rightarrow$  limite inhibition de la nitrogénase par  $\text{O}_2$
- $\Rightarrow$  *Rhizobium* contente
- $\Rightarrow$  Fabacée très contente



Importance des facteurs  
environnementaux dans  
établissement des  
nodosités (cf DS): NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Fixation de N<sub>2</sub> au sein d'une nodosité d'une Fabacée

# CONCLUSION :

- Végétaux à l'**interface sol-atmosphère** : exploitent les deux compartiments via des **surfaces d'échange spécialisées** : **racines, feuilles**
- Des **organes et des tissus de conduction** qui interconnectent les différents compartiments : tige, faisceaux cribro-vasculaires contenant xylème et phloème
- La circulation des sèves est issue des différences de **potentiels hydriques**, qui s'expliquent par des différences de potentiels osmotique, gravitaires, hydrostatiques et matriciels.
- Ces différences de potentiels hydriques sont maintenues par des **mécanismes actifs** (absorption active d'ions et flux d'eau/poussée racinaire) ou **passifs** (évapotranspiration foliaire).
- La **circulation des sèves** est un mécanisme **contrôlé**, variable en fonction des **conditions du milieu et périodique**.
- **Adaptation à la vie fixée en milieu aérien** : optimisation de l'exploitation des ressources diluées via une **plasticité phénotypique** et via des **associations symbiotiques**, surfaces limitant les pertes en eau, variabilité saisonnière de fonctionnement à associer à la variabilité temporelle de la quantité de ressources (eau, lumière en majorité).

# SUJETS ORAUX

- La racine, relation structure-fonction
- Le flux hydrique du sol à l'atmosphère chez les Angiospermes
- Les végétaux aériens et l'eau
- Le carbone, de l'atmosphère à un organe de réserve chez les végétaux
- La feuille, diversité cellulaire et unité fonctionnelle
- Interdépendance des organes aériens et souterrains des végétaux
- La tige des Angiospermes
- Les sèves
- La vie d'un végétal le jour et la nuit
- La vie d'un végétal au cours des saisons
- Vie des végétaux, des êtres vivants fixés
- Vie des végétaux et variabilité du milieu aérien à différentes échelles de temps
- Le CO<sub>2</sub> et les organismes végétaux
- Les végétaux et la lumière
- Les échanges gazeux entre les êtres vivants et le milieu aérien
- La vie en milieu aérien : comparaison des végétaux et des animaux (2023)