

II – ABSORPTION ET TRANSPORT DE L'EAU

L'eau et les plantes

Teneur en eau (%) = $(MF - MS) \times 100 / MF$

90-98% de l'eau absorbée par la plante est perdue par **évaporation - transpiration**

→ **continuum sol - plante - atmosphère**

A - Rôles de l'eau

Fonctions générales

- ✓ **solvant** (ions, molécules organiques)
- ✓ **agent structurant** (protéines, acides nucléiques)
- ✓ **substrat** de réactions enzymatiques (hydrolyse, condensation...)

Fonctions mécaniques et physiologiques chez les plantes

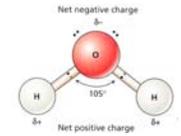
- ✓ **transport de solutés** (ions, molécules organiques)
- ✓ **transport de chaleur** (refroidissement par évapo-transpiration)
- ✓ **croissance cellulaire** (pression de turgescence)
- ✓ **squelette hydrique**, port dressé des plantes (pression de turgescence)

B - Propriétés de l'eau

Dipôle :

→ formation de **liaisons hydrogène (électrostatiques)**

→ **cohésion**, réseau : eau liquide à T° ambiante et P atmosphérique

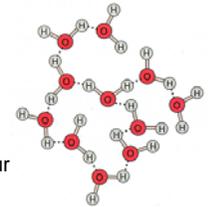


Bio242
S. Ravanel

Solvant remarquable → sphères d'hydratation

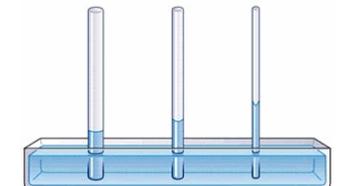
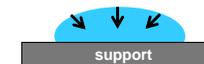
Très bon régulateur thermique

- ✓ forte capacité d'absorption de chaleur / unité de volume (chaleur spécifique)
- ✓ transition liquide-gaz nécessite une grande quantité d'énergie (chaleur latente de vaporisation)



Forces de cohésion et d'adhésion

- ✓ forte tension superficielle à l'interface liquide-gaz
- ✓ adhésion aux surfaces solides
→ phénomène de **capillarité**



C - Mécanismes de transport de l'eau

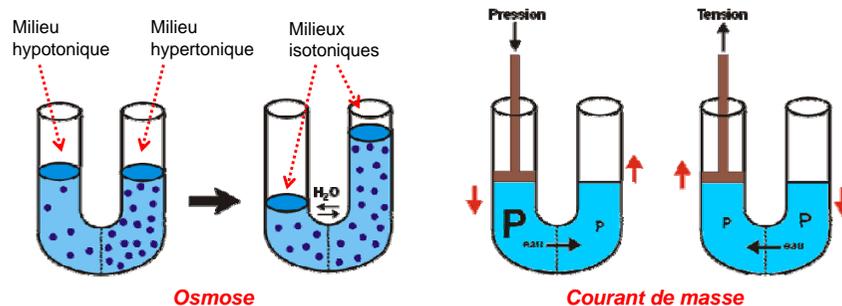
1 - Gravité

2 - Osmose : diffusion des molécules d'eau à travers une **membrane semi-perméable**

- ✓ phénomène **passif** régit par un **gradient de concentration**
- ✓ mécanisme principal de transport d'eau sur de **courtes distances**

3 - Courant de masse (mass flow)

- ✓ phénomène **passif** régit par un **gradient de pression**
- ✓ mécanisme principal de transport d'eau sur de **longues distances**



D - Potentiel hydrique (Ψ psi)

Base thermodynamique pour étudier et prédire les mouvements d'eau

Ψ = énergie libre de l'eau par unité de masse

→ Unité de pression : 1 **Pascal (Pa)** = $1 \text{ N m}^{-2} = 1 \text{ J m}^{-3}$

1 atm = 1,013 bar = 0,1013 MPa

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g$$

> Ψ_s : **potentiel osmotique**, dépend de la **concentration en substances dissoutes** dans l'eau.

Solutés → diminution de l'énergie libre de l'eau → terme négatif

> Ψ_p : **potentiel de pression**, dépend de la **pression hydrostatique** exercée sur l'eau. Terme positif (pression) ou négatif (tension).

Cellule végétale : **pression de turgescence** = pression exercée par le protoplaste sur la paroi

> Ψ_g : **potentiel gravitationnel**, dépend de la position de l'eau dans le **champ gravitationnel**.

Terme généralement négligeable sauf dans le cas des grands arbres (0,01 MPa / mètre)

Etude des mouvements d'eau : modèle artificiel

Par convention :

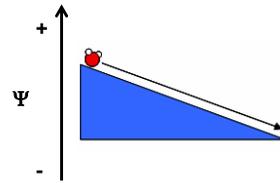
$\Psi_p = 0$ à pression atmosphérique standard

$\Psi_s = -RTC$

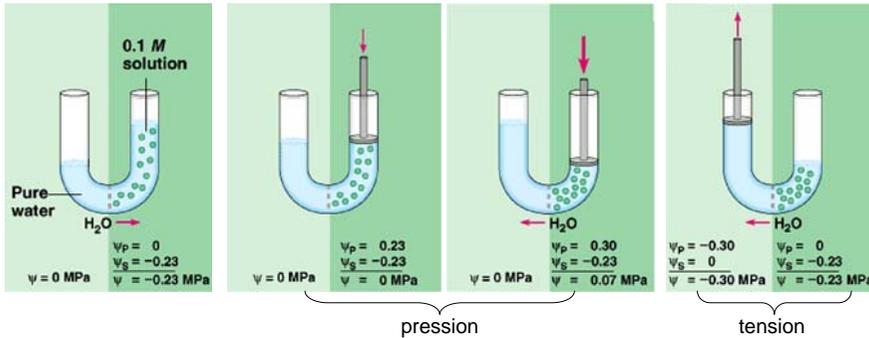
R, constante des gaz parfaits ($8,32 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T, température absolue ($^{\circ}\text{K}$)

C, concentration en substances dissoutes



Les mouvements d'eau se font toujours suivant un gradient décroissant de Ψ



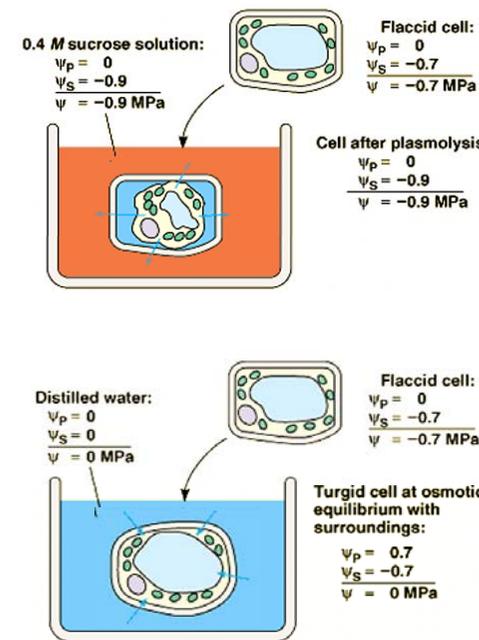
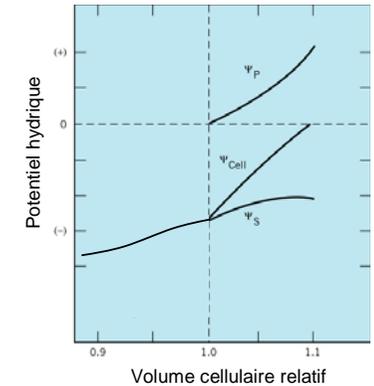
Etude des mouvements d'eau : modèle cellulaire

Bio242

S. Ravanel

Diagramme de Höffler

Evolution des composantes de Ψ_c en fonction du volume cellulaire

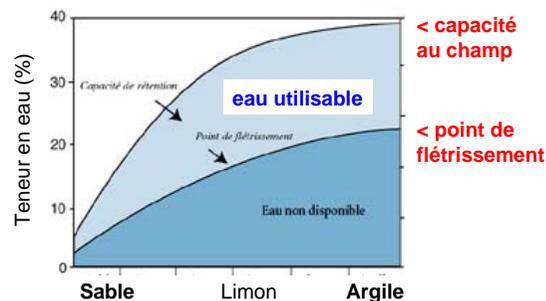


2/ Relations hydriques dans la plante entière

A - L'eau dans le sol

Eau utilisable/disponible par la plante comprise entre :

- ✓ Capacité au champ = capacité de rétention maximale d'eau après drainage
- ✓ Point de flétrissement permanent = humidité du sol en deçà de laquelle la plante flétrit de façon irréversible



Potentiel hydrique du sol ($\Psi_{sol} = \Psi_s + \Psi_p$)

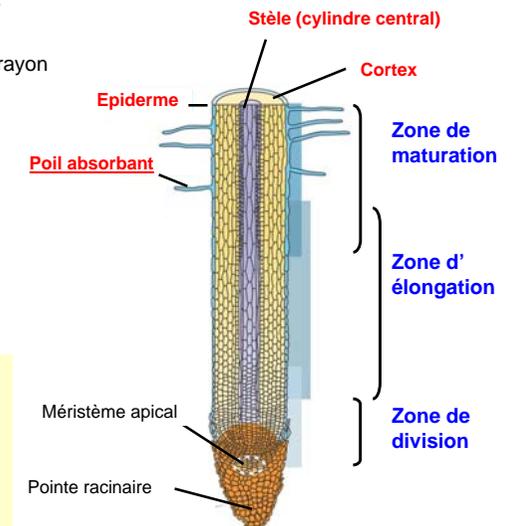
- ✓ solution de sol faiblement concentrée $\rightarrow \Psi_s$ faiblement négatif ($-0,02 \text{ MPa}$)
 - ✓ adhésion des molécules d'eau aux particules de sol $\rightarrow \Psi_p$ négatif (potentiel matriciel)
- Sol mouillé $\rightarrow \Psi_p$ faiblement négatif ; sol qui s'assèche $\rightarrow \Psi_p$ fortement négatif

\rightarrow Mouvements d'eau dans le sol par courant de masse (gradient de pression)

B - Absorption racinaire de l'eau

Racine = organe d'absorption

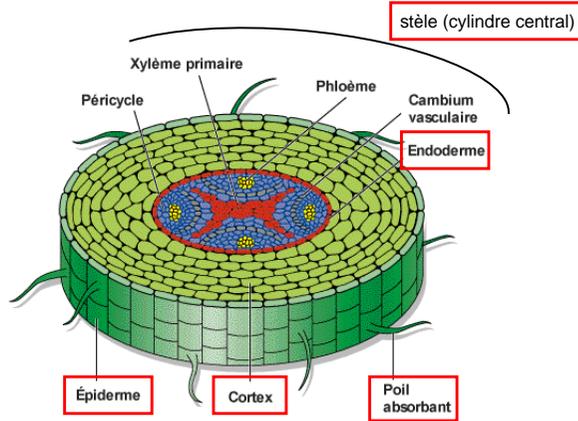
- ✓ jusqu'à >50% de la masse d'une plante
 - ✓ plant de maïs de 2 m de hauteur
- \rightarrow racines = 6 m de profondeur, 10 m de rayon



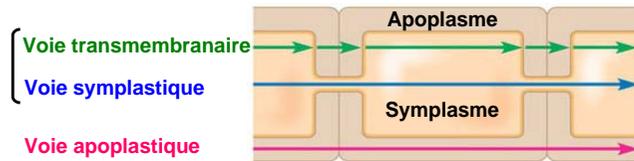
Stratégies pour augmenter la surface d'échange racine - sol

- ✓ poils absorbants = zone principale d'absorption de l'eau
- ✓ associations symbiotiques racines-champignons du sol = mycorhizes

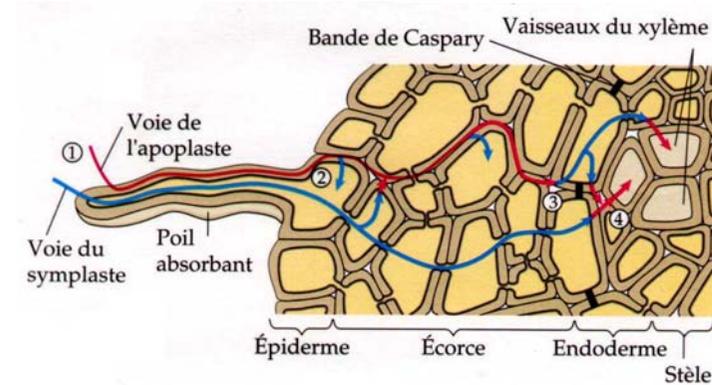
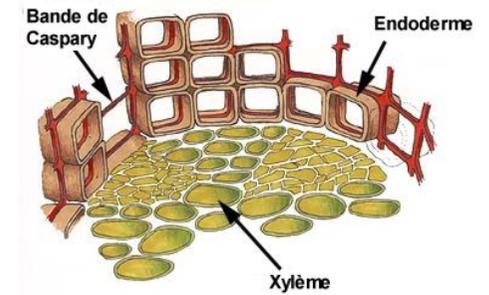
Coupe transversale d'une racine



→ 2 alternatives pour passer du sol au xylème :



Transport radial de l'eau (et des minéraux) dans la racine

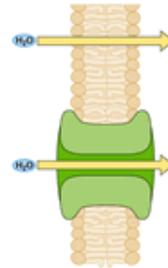


Les aquaporines : canaux impliqués dans le transport d'eau

→ Implication des **aquaporines = régulation locale de la vitesse de transport** sans modifier le sens thermodynamique (Ψ décroissant)

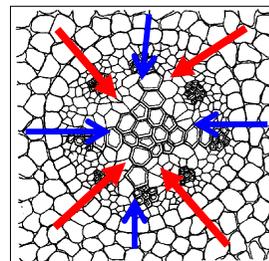
Situation paradoxale : réponse des plantes à une inondation

Sol inondé → anoxie (forte diminution O_2) → baisse de la respiration → alcalinisation du pH intracellulaire → diminution de la conductance des aquaporines → blocage complet du transport d'eau racinaire → flétrissement !!



La poussée racinaire (pression racinaire)

- ✓ dans la racine, les **mouvements d'eau sont associés au transport des minéraux**
- transport actif des minéraux dans le xylème (**chargement du xylème**)
- diminution du potentiel hydrique Ψ
- appel d'eau vers le xylème qui génère une **pression hydrostatique racinaire** qui "pousse" la sève brute vers les parties aériennes



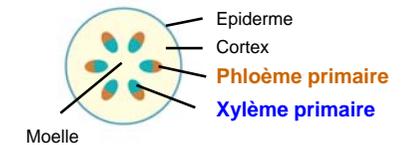
Transport actif de minéraux
Transport passif d'eau

C - Transport de l'eau dans le xylème

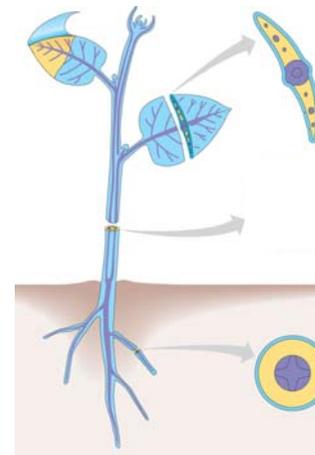
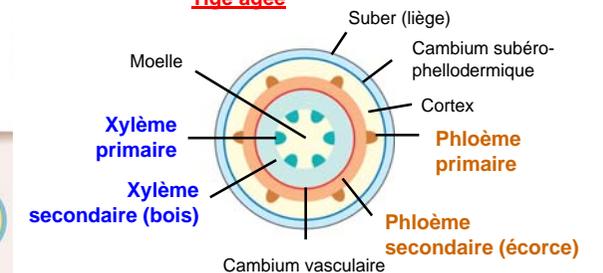
Localisation des tissus conducteurs

- ✓ **systèmes continus** dans tous les organes
- ✓ produits par les méristèmes primaires et secondaires (cambium)

Tige jeune



Tige âgée



Organisation du xylème

- ✓ constitué de **cellules allongées à parois épaisses et lignifiées, mortes et vidées de leur contenu** → « tuyau rigide » formant une **colonne d'eau ininterrompue**
- ✓ **lignine hydrophobe** → **faible adhésion de l'eau** aux éléments conducteurs

Trachéides (Gymnospermes & Angiospermes)

10 - 50 µm de diamètre

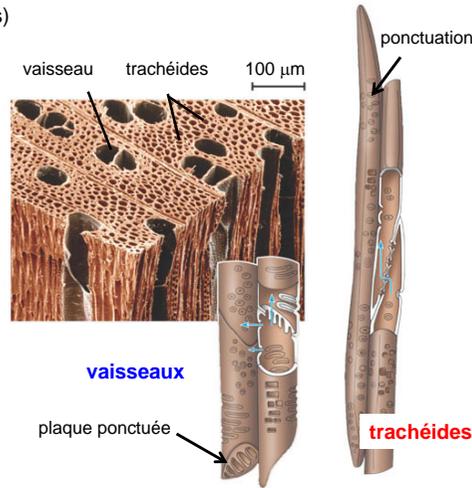
Les **punctuations doubles** entre trachéides facilitent le transport d'eau

Vaisseaux (Angiospermes)

20 - 400 µm de diamètre

Les **plaques ponctuées** entre vaisseaux facilitent le transport d'eau

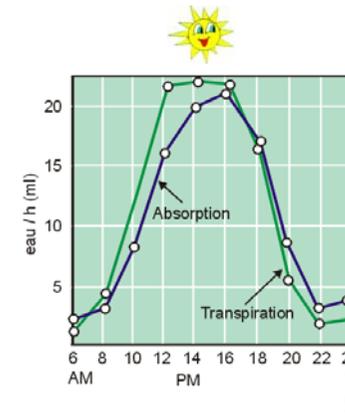
→ plus le diamètre de l'élément conducteur est grand plus le transport d'eau est important (loi de Poiseuille)



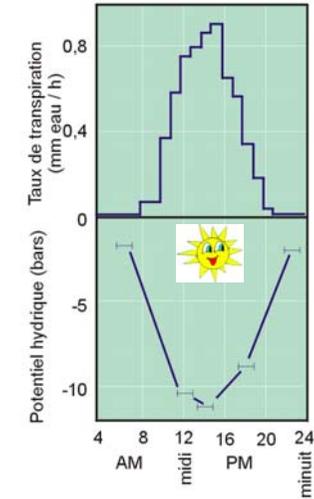
D - Transpiration

90-98% de l'eau absorbée est perdue par transpiration

- ✓ **moteur de l'ascension de la sève brute**
- ✓ **refroidissement de la feuille**



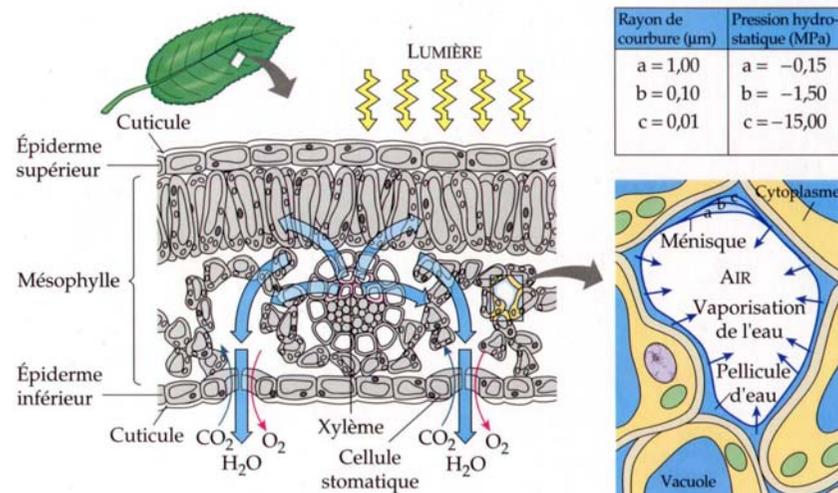
Absorption d'eau et transpiration d'une plante en été



Taux de transpiration et variations du potentiel hydrique dans les vaisseaux

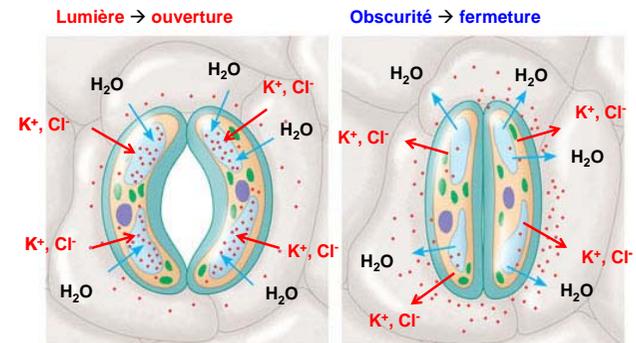
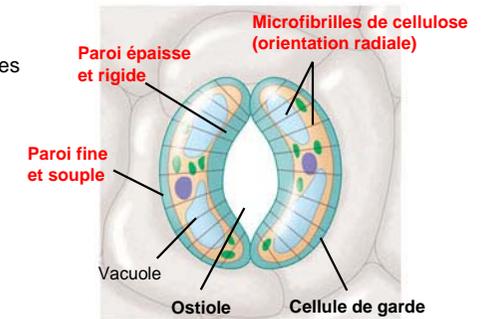
Mécanisme d'évaporation-transpiration

- 1 - Sève brute distribuée dans les **parois** des cellules de mésophylle
- 2 - **Pellicule d'eau liquide adsorbée aux parois s'évapore** dans les espaces intercellulaires → diffusion dans l'atmosphère par les stomates
- 3 - **Rétraction** de la pellicule d'eau → **tension hydrostatique** qui « tire » la sève brute



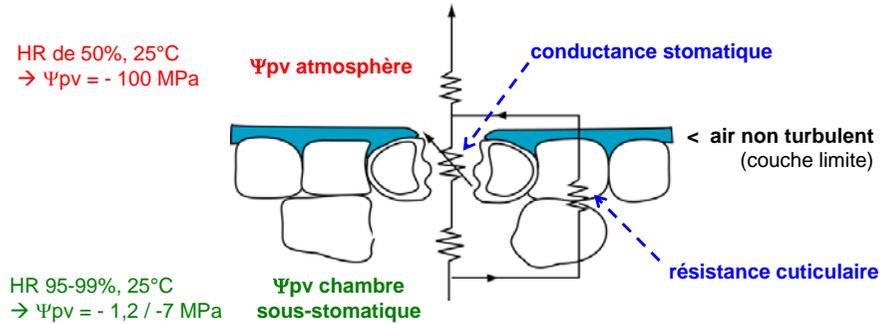
Contrôle de la transpiration

95% de la vapeur d'eau quitte la feuille par les **stomates** → **contrôle de la conductance stomatique** (ouverture/fermeture)

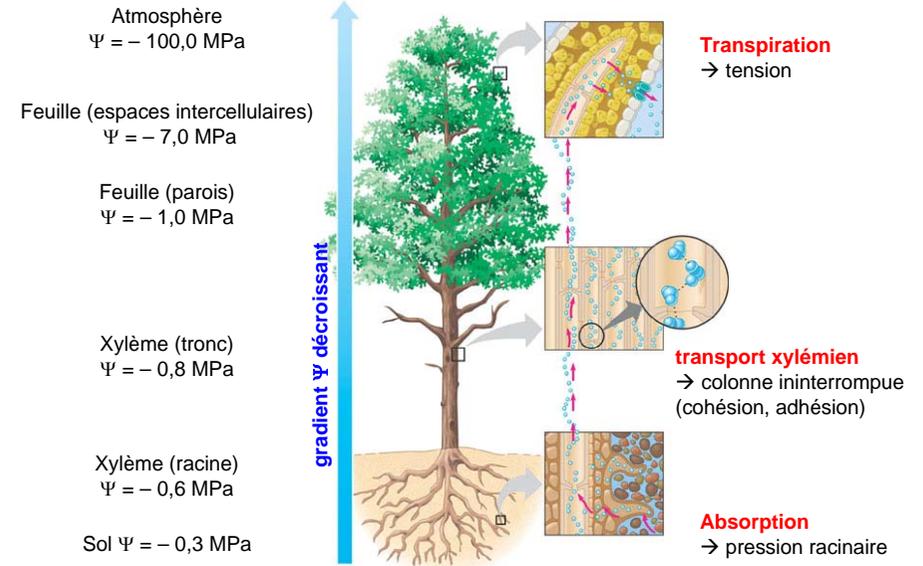


Autres facteurs impliqués dans le contrôle de la transpiration

- ✓ **amplitude du gradient de pression de vapeur d'eau (Ψ_{pv})** entre l'atmosphère et la chambre sous-stomatique
 $\Psi_{pv} = 1,06 T \log (HR/100)$ avec HR, **humidité relative** de l'air et T, **température** absolue
- ✓ **vitesse du vent** → contrôle de l'épaisseur de la couche d'air non turbulent à la surface des feuilles



Récapitulatif des mouvements d'eau dans la plante



3/ Adaptation des plantes au déficit hydrique

Déficit hydrique : quantité d'eau évaporée > quantité d'eau absorbée

- menace pour la survie de la plante
- réponses physiologiques (court et moyen termes) ou adaptatives (long terme)



A - Réponses physiologiques

Fermeture des stomates

- ✓ augmentation de la concentration en **acide abscissique (ABA)** dans les feuilles → fixation sur un récepteur membranaire des cellules de garde → efflux de K^+ et Cl^- → sortie d'eau → fermeture de l'ostiole

Ajustement osmotique

- ✓ synthèse et accumulation d'**osmo-protectants** (sorbitol, proline...) → diminution de Ψ → entrée d'eau → maintien de la pression de turgescence

Réponses développementales

- ✓ diminution de la **taille des feuilles**
- ✓ diminution de la **quantité de feuilles**
- ✓ augmentation des dépôts de **cires cuticulaires**

B - Réponses adaptatives

Plantes adaptées au déficit hydrique = **xérophytes**

Développement du système racinaire

- ✓ en surface (ramification) et/ou en profondeur

Diminution de la surface foliaire

- ✓ perte des feuilles avant la saison sèche
- ✓ feuilles très réduites/inexistantes (Cactées)

Protection des stomates

- ✓ stomates enfouis au fond de cryptes
- ✓ surface foliaire recouverte de poils

Constitution de réserves d'eau

- ✓ tiges/feuilles contenant des parenchymes aquifères → stockage de l'eau dans de grandes vacuoles

Adaptations métaboliques

- ✓ plantes CAM → ouverture des stomates la nuit



III/ Nutrition minérale

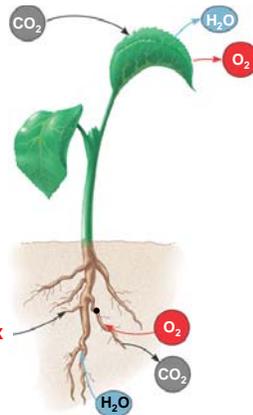
1/ Besoins en éléments minéraux des végétaux

Définition d'un élément essentiel :

- ✓ élément nécessaire à l'accomplissement d'un cycle complet de développement
- ✓ élément connu pour son rôle physiologique ou comme constituant de la plante

✓ **Carbone, Hydrogène, Oxygène** ne sont pas des minéraux → apport par H₂O, O₂ et CO₂

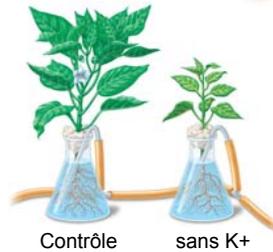
Minéraux



A - Mise en évidence des besoins

Cultures hydroponiques

→ contrôle de l'oxygénation, du pH, de la concentration en minéraux



B - Les éléments nutritifs essentiels

✓ 17 éléments nutritifs essentiels

✓ **éléments bénéfiques** pour certaines plantes : sodium, silicium, cobalt

Élément	Symbole chimique	Masse Atomique	Formes ioniques absorbées	Concentration (poids sec)
3 éléments obtenus de H₂O, O₂ et CO₂				
Carbone	C	12.01	CO ₂	45 %
Hydrogène	H	1.01	H ₂ O	6 %
Oxygène	O	16.00	O ₂ , H ₂ O	45 %
6 Macro-éléments				
Azote	N	14.01	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1,5 %
Potassium	K	39.10	K ⁺	1,0 %
Calcium	Ca	40.08	Ca ²⁺	0,5 %
Magnésium	Mg	24.32	Mg ²⁺	0,2 %
Phosphore	P	30.98	PO ₄ ³⁻ , HPO ₄ ²⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻	0,2 %
Soufre	S	32.07	SO ₄ ²⁻	0,1 %
8 Micro-éléments				
Chlore	Cl	35.46	Cl ⁻	3000 ppm
Fer	Fe	55.85	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	2000 ppm
Bore	B	10.82	BO ₃ ²⁻ , B ₄ O ₇ ²⁻	2000 ppm
Manganèse	Mn	54.94	Mn ²⁺	1000 ppm
Zinc	Zn	65.38	Zn ²⁺	300 ppm
Cuivre	Cu	63.54	Cu ²⁺	100 ppm
Nickel	Ni	58.69	Ni ²⁺	2 ppm
Molybdène	Mo	95.95	MoO ₄ ²⁻	1 ppm

Rôles biologiques de certains éléments nutritifs

Eléments qui entrent dans la composition de molécules organiques

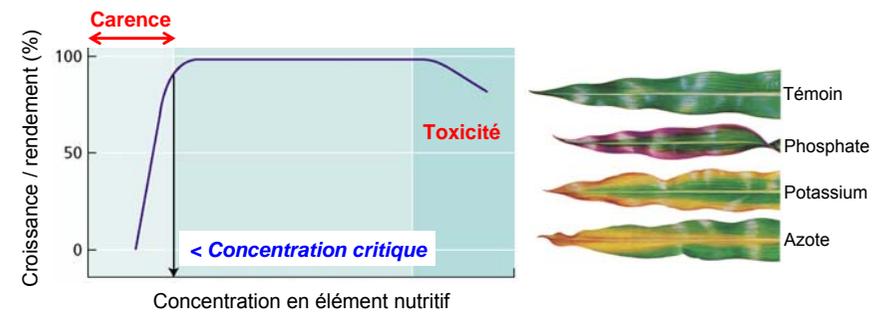
- ✓ **Azote** : assimilation après réduction → acides aminés, bases azotées, coenzymes (NAD, NADP...)
- ✓ **Soufre** : assimilation après réduction → acides aminés (cystéine, méthionine), coenzymes (coenzyme A...)
- ✓ **Phosphore** → nucléotides, sucres phosphorylés, phospholipides, coenzymes...

Eléments utilisés sous forme ionique

- ✓ **cofacteurs** de réactions enzymatiques → Mg, Mn, Cl, K, Ca, Fe, Cu, Zn, Mo
- ✓ **rôle constitutif** → Mg (chlorophylles), Ca (paroi)...
- ✓ **signalisation cellulaire** → Ca
- ✓ **pression de turgescence** → K, Cl

Carences en éléments nutritifs

✓ Apport en nutriment(s) en dessous de la concentration critique (croissance optimale)



✓ **Symptômes** = ralentissement de la croissance, chlorose, nécrose...

- éléments mobiles dans la plante (N, K, Mg, P, Cl, Zn, Mo) → premiers symptômes dans les tissus âgés → tissus en croissance préservés
- éléments immobiles dans la plante (S, Ca, Fe, Cu, Bo) → premiers symptômes dans les tissus jeunes

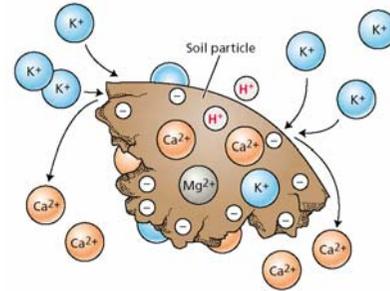
✓ **Augmentation des rendements agricoles** → engrais organiques (humus, fumier) et chimiques : **N-P-K**

2/ Interactions sols - racines - microorganismes

A - Les minéraux dans le sol

Complexe argilo-humique (CAH)

- ✓ **structure colloïdale** = petites particules en suspension dans la solution du sol
- ✓ fractions minérale (**argile**) et organique (**humus**)
- ✓ **chargé négativement**



✓ adsorption réversible de cations

affinité variable cation / CAH : Al³⁺ > H⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺/NH₄⁺ > Na⁺

✓ **anions non adsorbés** directement et lessivés dans le sol (nitrate NO₃⁻) ou adsorbés via des cations di- ou trivalents

→ **équilibre dynamique entre le CAH, la solution du sol et la racine**

→ **capacité d'échange cationique** +/- importante en fonction du **pH du sol**
(sol acide → déplacement des cations par les H⁺)

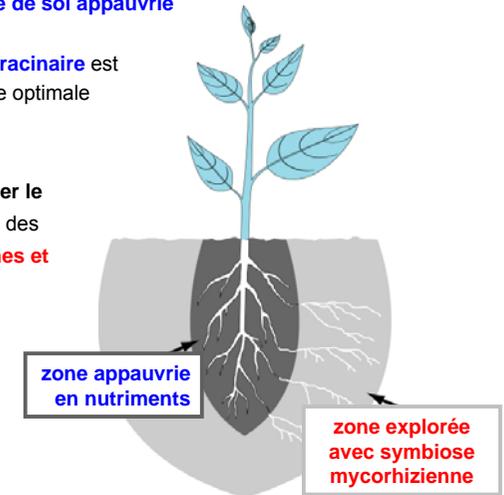
B - Interactions symbiotiques racines - microorganismes

Toutes les zones de la racine sont capables d'absorber les minéraux

→ l'absorption racinaire génère une **zone de sol appauvrie** en minéraux

→ la **croissance continue du système racinaire** est nécessaire pour une nutrition minérale optimale

Pour **augmenter leur capacité d'explorer le sol**, la plupart des plantes ont développé des **associations symbiotiques entre racines et champignons du sol = mycorhizes**

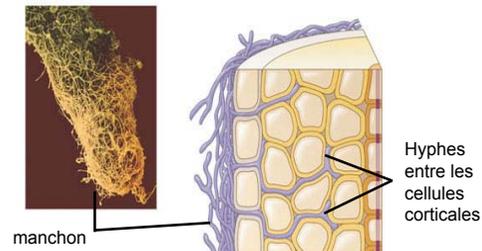


Hyphes fongiques = longs filaments (formant le mycélium) capables d'**explorer de grands volumes de sols**

Ectomycorhizes : arbres des régions tempérées

→ **manchon mycorhizien** autour de la racine

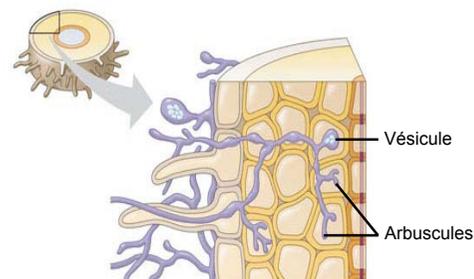
→ envahissement des **espaces intercellulaires du cortex**



Endomycorhizes : les plus répandues
Les hyphes se développent à l'**intérieur des cellules corticales**

→ structures ramifiées = **arbuscules**

→ structures de réserve = **vésicules**



3/ Absorption racinaire des minéraux

A - Mécanismes de transport des ions

Transports passifs, bidirectionnels : dans le sens décroissant du gradient électrochimique

✓ **diffusion simple** (petites molécules polaires ou molécules hydrophobes)

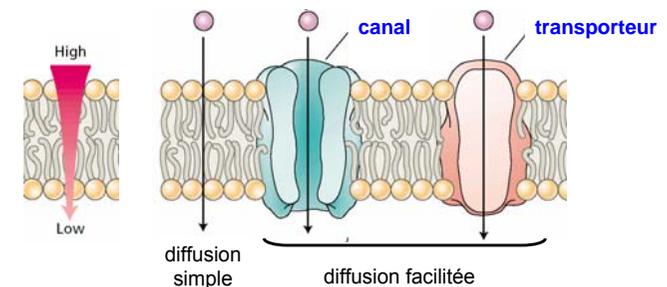
✓ **diffusion facilitée** :

→ **canaux** : ouverture / fermeture du pore

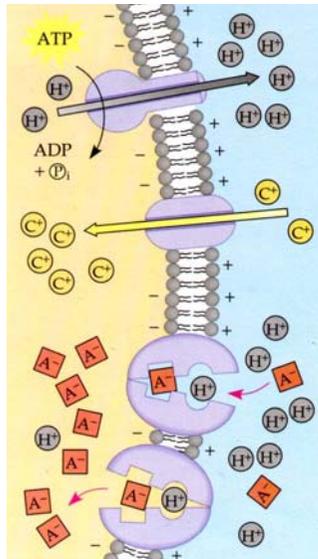
vitesse de transport élevée (10⁸ molécules / s)

→ **transporteurs** : fonctionnement de type enzyme / substrat

vitesse de transport 10² - 10³ molécules / s



Transports actifs, unidirectionnels : dans le sens croissant du gradient électrochimique
 → accumulation de la molécule transportée → besoin d'**énergie métabolique** (ATP)



✓ **Transports actifs primaires** : ATPases pompes à **protons** (ou Ca^{2+}) → création d'une force proton-motrice (gradient électrochimique)

✓ **Transports actifs secondaires** : utilisation de l'énergie du gradient électrochimique pour

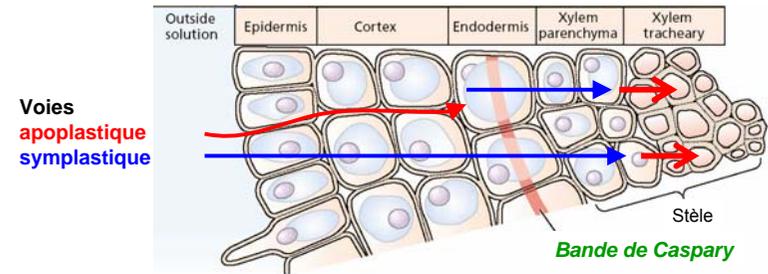
→ le **transport de cations** (C^+)

→ le **co-transport d'anions** (A^-)/ H^+ ou de **molécules neutres** / H^+

B - Transport des ions dans la racine

✓ **Epiderme → endoderme** : **voies apoplastique et symplastique** (comme pour l'eau)
 ✓ **Traversée de l'endoderme** : **passage symplastique obligatoire** (comme pour l'eau)
 → transporteurs / canaux sur le plasmalemme des cellules épidermiques et endodermiques ; transports passifs et actifs

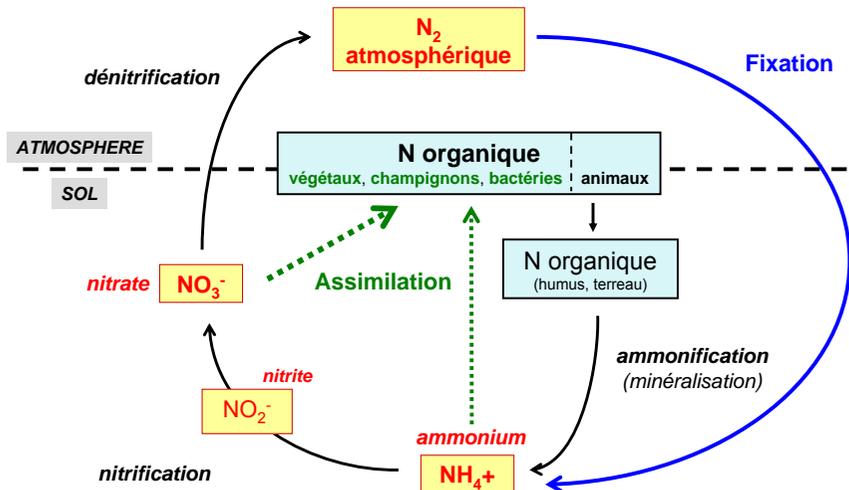
✓ **Chargement du xylème** : **passage symplaste → apoplaste**
 → transporteurs sur le plasmalemme des cellules du parenchyme xylémien
 → expulsion des ions dans les éléments conducteurs (vaisseaux, trachéides)
 → **les minéraux s'accumulent dans le xylème** (transports actifs)



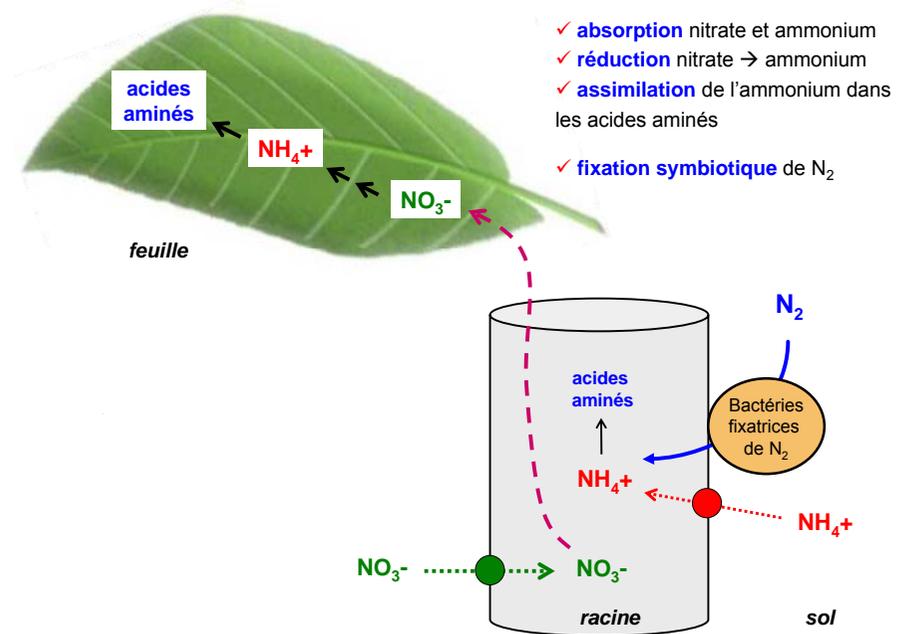
4/ Assimilation de l'azote

Les grandes étapes du cycle de l'azote :

- ✓ **Fixation** : réduction N_2 → ammonium par les **bactéries fixatrices d'azote**
- ✓ **Conversions des formes inorganiques** par des bactéries du sol
- ✓ **Assimilation par les plantes**, champignons, bactéries



Les principales étapes de l'assimilation de l'azote



- ✓ **absorption** nitrate et ammonium
- ✓ **réduction** nitrate → ammonium
- ✓ **assimilation** de l'ammonium dans les acides aminés
- ✓ **fixation symbiotique** de N_2

B - Absorption et réduction du nitrate et de l'ammonium

Absorption de l'ammonium

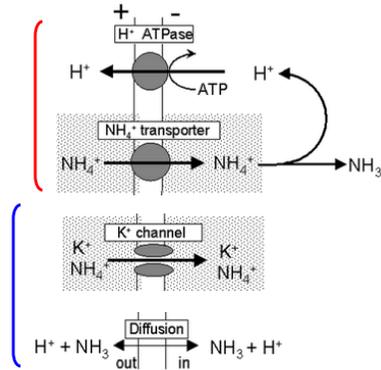
- ✓ ammonium retenu par le CAH
- ✓ 2 types de transporteurs, à **haute/basse affinité** pour l'ammonium → **adaptation** aux concentrations variables dans le sol

Transport à haute affinité : transport actif secondaire couplé à une ATPase pompe à protons

Transports à faible affinité : simple diffusion à travers la membrane plasmique ou via des canaux potassiques

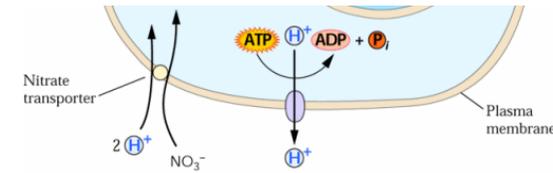
Devenir de l'ammonium dans les racines

- ✓ Assimilation → acides aminés
- ✓ Stockage dans la vacuole (ammonium = molécule toxique)

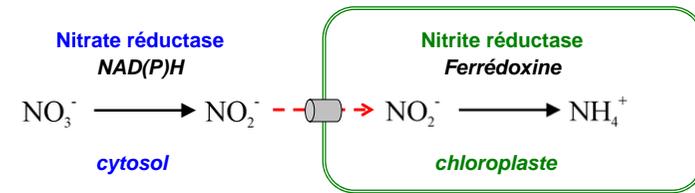


Absorption du nitrate

- ✓ nitrate non retenu par le CAH (→ lessivage, risque de pollution des nappes phréatiques)
- ✓ 2 types de transporteurs, à **haute/basse affinité** pour le nitrate → **adaptation** aux concentrations variables dans le sol
- ✓ **transport actif** : ATPase pompe à protons et co-transport $\text{NO}_3^- / \text{H}^+$
- ✓ coût énergétique : ~25% de la respiration racinaire

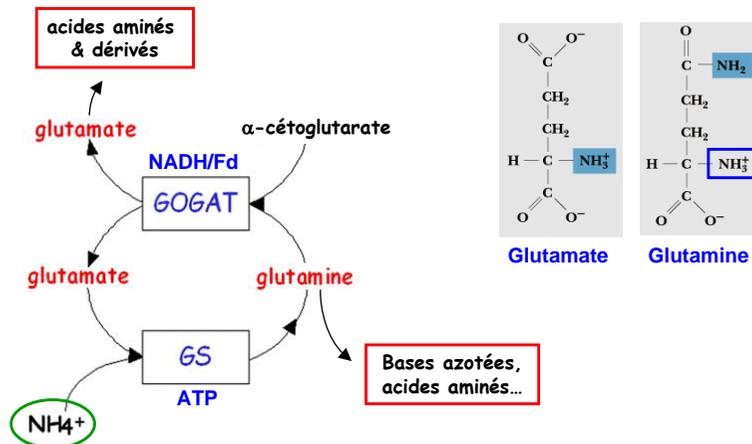


Réduction du nitrate en ammonium dans les feuilles



C - Assimilation de l'azote : cycle GS/GOGAT

- ✓ Glutamate et Glutamine = portes d'entrée de l'azote dans le métabolisme cellulaire
- ✓ 2 enzymes clés : **GS : glutamine synthétase**
GOGAT : glutamine oxoglutarate amido transférase



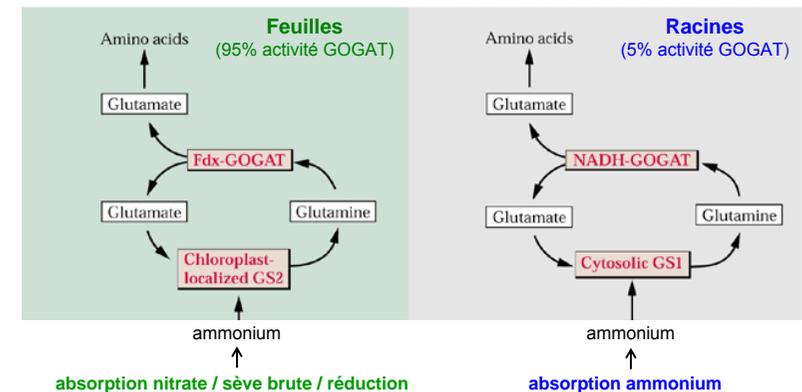
Rôles physiologiques des cycles GS/GOGAT dans les racines et les feuilles

Feuilles

- ✓ **GS chloroplastique** et GOGAT (Ferrédoxine-dépendante) chloroplastique
- ✓ assimilation de l'ammonium issu de la réduction du **nitrate** absorbé par les racines

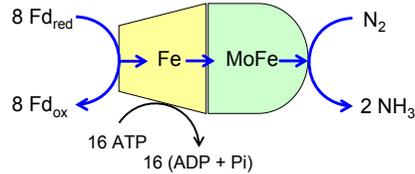
Racines

- ✓ **GS cytosolique** et GOGAT (NADH-dépendante) plasmidiale
- ✓ assimilation de l'**ammonium** absorbé par les racines



D - Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

- ✓ Diazote = gaz extrêmement stable (N≡N)
- ✓ Fixation N₂ = réaction de **réduction** couplée à une **hydrolyse d'ATP** catalysée par la **nitrogénase**
- ✓ La nitrogénase fonctionne en **conditions anaérobies**



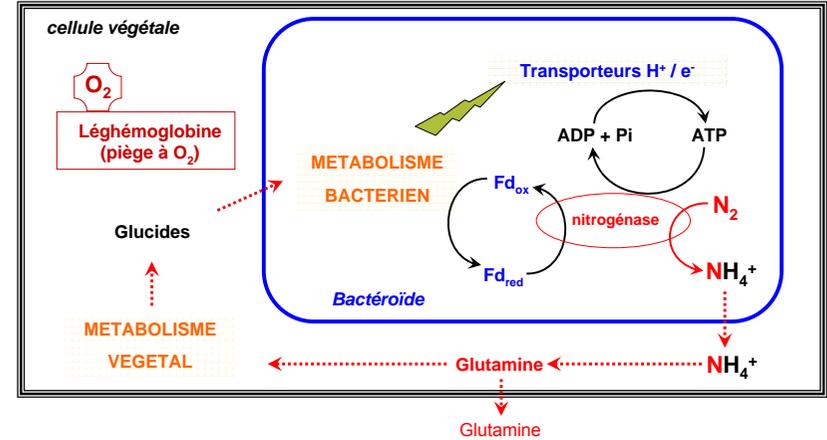
- ✓ Seuls quelques **micro-organismes** sont fixateurs d'azote
 - micro-organismes **libres** (sols, sédiments marins) : bactéries et cyanobactéries
 - micro-organismes du genre **Rhizobium en symbiose avec des plantes de la famille des légumineuses** (pois, luzerne, soja...) → formation de **nodosités** (ou nodules)



soja / *Rhizobium japonicum*

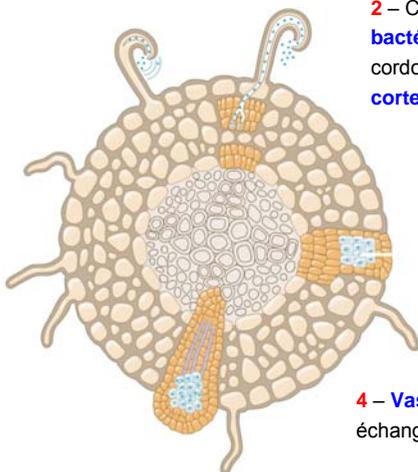
Interactions métaboliques hôte / symbionte

- ✓ **Bactérie → plante** : **azote réduit** ; en cas de fixation importante NH₄⁺ est exporté dans le sol → fertilisation
- ✓ **Plante → bactérie** :
 - coût de la fixation symbiotique pour l'hôte : 12-17 g de **glucides** / 1 g d'azote fixé
 - production de **légghémoglobine** (protéine fixant O₂) pour protéger la nitrogénase



Développement du nodule

1 – Sécrétion de composés par la racine → attraction des bactéries (**chimiotactisme positif**) → synthèse et sécrétion de **facteurs Nod** par les bactéries → stimulation de la **croissance des poils absorbants**, formation d'une crosse



2 – Création d'un **cordon d'infection** dans lequel **les bactéries se divisent** → progression et ramification du cordon dans le cortex → **prolifération des cellules du cortex/péricycle**

3 – Bourgeonnement du cordon → vésicules contenant des bactéries spécialisées dans la fixation d'azote = **bactéroïdes** ; formation du nodule

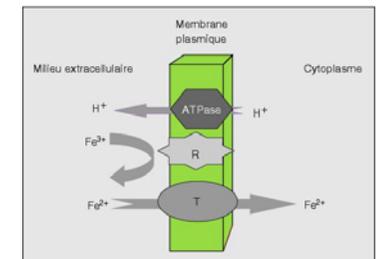
4 – **Vascularisation** du nodule pour permettre les échanges de nutriments entre hôte et symbionte

5/ Assimilation du fer

Dans le sol, forme majoritaire **Fe³⁺** formant des oxydes hydratés **insolubles** à pH neutre → **stratégies pour augmenter la solubilité et la disponibilité en fer**

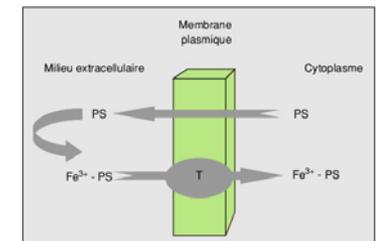
Plantes non graminées

- ✓ **acidification** du sol en expulsant des protons
- ✓ augmentation de la solubilité du Fe³⁺
- ✓ **réduction** Fe³⁺ → Fe²⁺
- ✓ **absorption** de Fe²⁺



Graminées

- ✓ **sécrétion** d'agents chélateurs du fer = **phytosidérophores** (PS)
- ✓ formation de complexes **Fe³⁺/PS** stables et solubles
- ✓ **absorption des chélats** Fe³⁺/PS
- ✓ **réduction** intracellulaire du Fe³⁺ et libération de Fe²⁺



IV/ Transport, distribution et utilisation des photoassimilats

1/ Relations sources - puits

A – Les organes sources – puits et la circulation des sèves

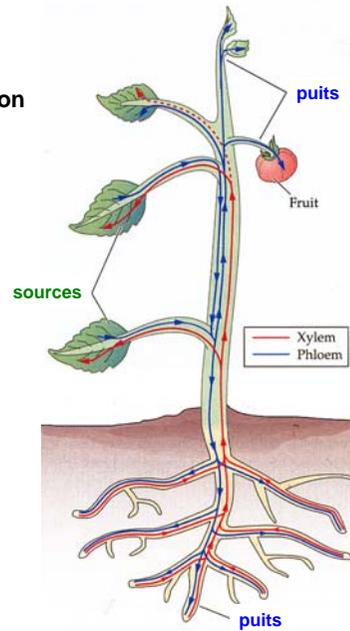
Double système de circulation

- ✓ **xylème** → sève brute (eau + minéraux) ; racines → organes aériens
- ✓ **phloème** → sève élaborée (photo-assimilats) ; organes sources → organes puits

Organes sources : produisent plus d'assimilats que nécessaire pour leurs propres besoins → **producteurs et exportateurs** = feuilles matures

Organes puits : **consommateurs et importateurs** d'assimilats = organes jeunes, racines, fruits

→ au cours du développement un organe puits peut devenir organe source



Caractéristiques des sèves brute et élaborée

	Sève brute	Sève élaborée
Sucres	- *	100 - 300 g/L
Acides aminés (Glu, Gln, Asp, Asn)	< 2 g/L	5 - 40 g/L
Minéraux	0,2 - 4 g/L	1 - 5 g/L
Protéines	-	1 - 2 g/L
Hormones	traces	traces
Potentiel osmotique (Ψs)	-0,02 / -0,2 MPa	-0,6 / -3 MPa
pH	5.4 - 6.5	7.3 - 8.5
Vitesse de circulation	1 - 60 m/h	~1 m/h



Collecte de sève élaborée (stylet de puceron)

Sucres transportés = non réducteurs

- ✓ **saccharose** (disaccharide)
- ✓ **polyols** (mannitol, sorbitol)
- ✓ **oligosaccharides** (raffinose, stachyose...)

* **Sève brute** de certains arbres (érable) au printemps → 2 - 5% de sucres = **sirop d'érable**

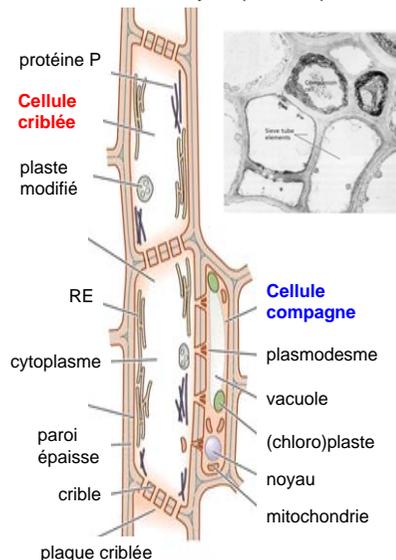
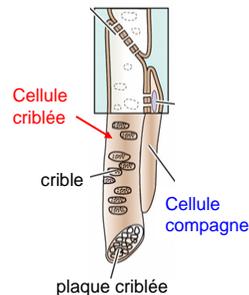


B – Structure du tissu phloémien

✓ **cellules criblées** : cellules allongées à parois épaisses, **vivantes** mais **anucléées** et pourvues d'un **cytoplasme appauvri** (pas de vacuole, de ribosomes, de cytosquelette, peu d'organites)

→ **tube criblé** = enchaînement de cellules criblées séparées par des **plaques criblées**

✓ **cellules compagnes** : subviennent aux besoins métaboliques des cellules criblées et transportent les assimilats des cellules sources aux tubes criblés (plasmodesmes)

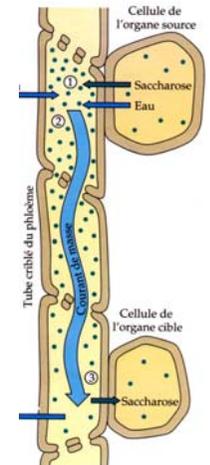
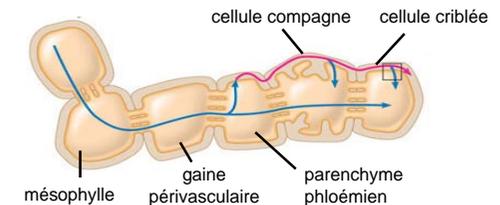
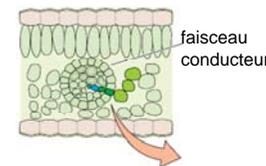


2/ Mécanismes de transport dans le phloème

3 étapes : → chargement du phloème
→ transport longitudinal
→ déchargement du phloème

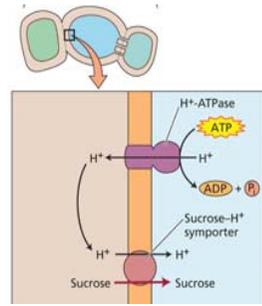
A – Chargement du phloème

- ✓ des cellules photosynthétiques au parenchyme phloémien → **voie symplastique**
- ✓ du parenchyme au complexe conducteur (cell. compagne + criblée) → espèces utilisant une **voie symplastique**
→ espèces utilisant une **voie apoplastique**



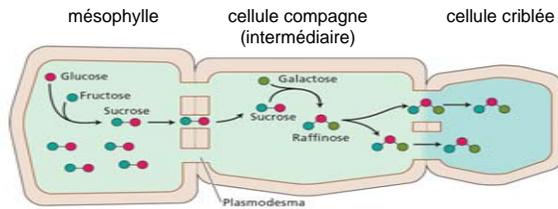
Voie apoplastique

- ✓ espèces avec peu de plasmodesmes autour du complexe conducteur
- ✓ libération du saccharose dans la paroi des cellules du parenchyme phloémien
- ✓ **co-transport actif saccharose/H⁺ dans les cellules compagnes (transport unidirectionnel)**
- **accumulation de saccharose dans la sève élaborée**

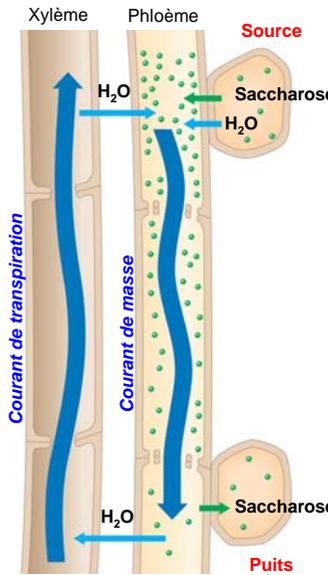


Voie symplastique

- ✓ espèces avec de nombreux plasmodesmes autour du complexe conducteur
- ✓ pour accumuler les sucres dans le phloème et éviter leur reflux → **système de piégeage par polymérisation** dans les cellules compagnes
- **conversion du saccharose en tri saccharides dans les cellules intermédiaires**



B – Transport longitudinal de la sève élaborée



- ✓ **transport de la sève par courant de masse** (phénomène passif, régi par le **gradient de pression**) ; les plaques criblées augmentent la résistance et propagent le gradient de pression

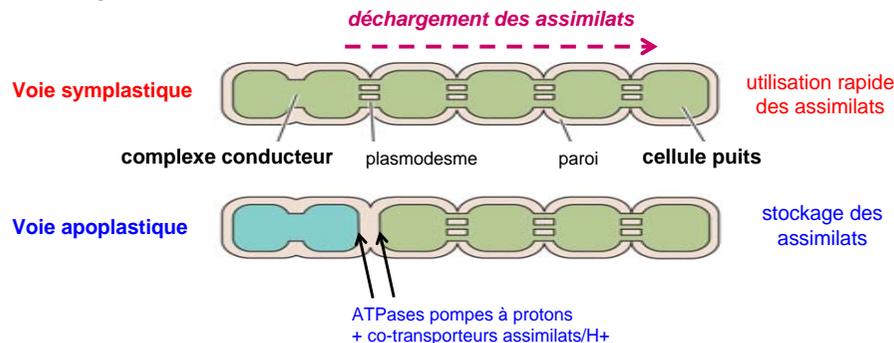
- ✓ **chargement du phloème**
 → diminution de Ψ s de la sève élaborée
 → influx d'eau provenant essentiellement du xylème
 → création d'une **force de pression hydrostatique positive**

- ✓ **déchargement du phloème**
 → augmentation de Ψ s de la sève élaborée
 → efflux d'eau vers le xylème
 → **baisse de la pression hydrostatique**

C – Déchargement du phloème

Existence de voies de déchargement du phloème symplastique et apoplastique ; **le transport des assimilats doit être unidirectionnel**

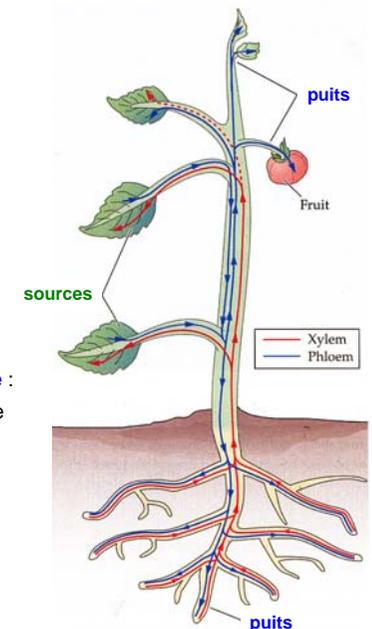
- ✓ **Voie symplastique** : l'**utilisation rapide des assimilats** (sucres, acides aminés) est nécessaire pour créer un gradient de concentration et maintenir le flux de sève
 → **organes puits jeunes en développement**
- ✓ **Voie apoplastique** : mécanismes de **co-transports actifs assimilats/H⁺** pour l'export des assimilats du complexe conducteur vers la paroi et de la paroi vers les cellules puits
 → **organes de réserve**



3/ Distribution des assimilats entre les puits

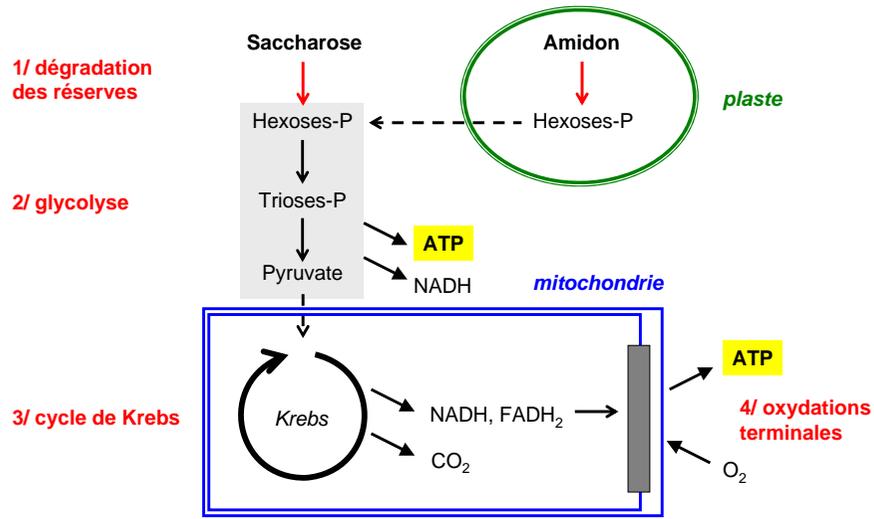
- ✓ **allocation = devenir des assimilats dans l'organe source**
 → **utilisation** = besoins métaboliques immédiats
 → **mise en réserve** (amidon)
 → **exportation** hors de la feuille : une feuille adulte exporte 50% du carbone qu'elle assimile

- ✓ **la distribution entre les différents puits dépend de :**
 → la **force des puits** = vitesse de consommation (ou de stockage) des assimilats X taille du puits
 → l'**éloignement** source/puits
 → la **régulation hormonale** de la partition



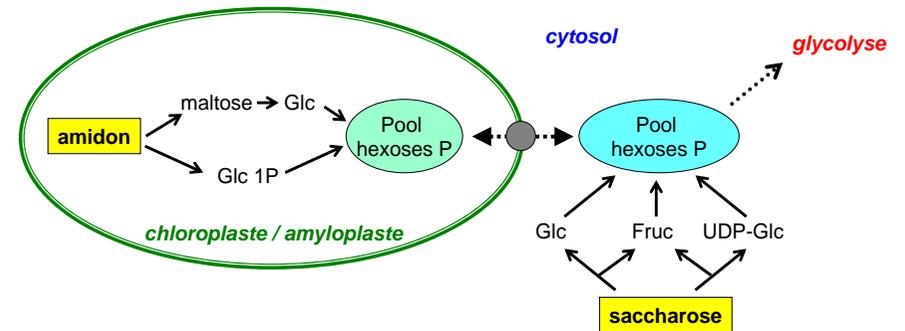
4/ Récupération de l'énergie des assimilats

Respiration cellulaire = oxydation de composés réduits (glucides...) afin de :
 1/ **récupérer l'énergie** emmagasinée au cours de la photosynthèse
 2/ **produire les squelettes carbonés** nécessaires à de nombreuses synthèses



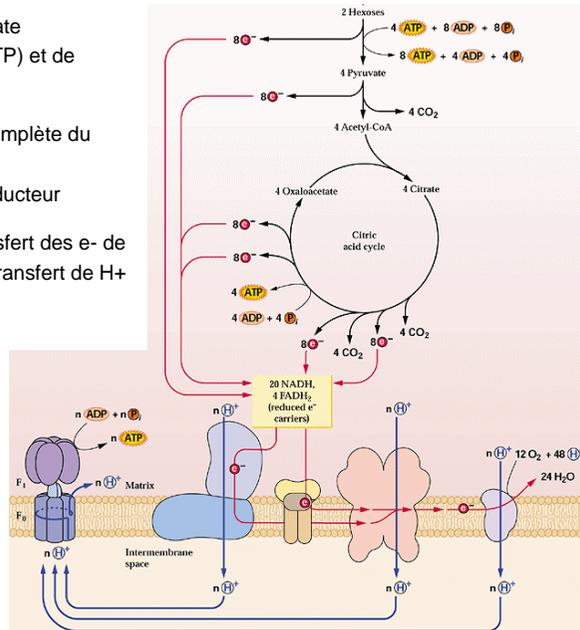
A - Dégradation du saccharose et de l'amidon

- ✓ **Hydrolyse du saccharose dans le cytosol**
 - **invertase** : saccharose → glucose + fructose
 - **saccharose synthase** : saccharose + UDP → UDP-Glc + fructose
- ✓ **Hydrolyse de l'amidon (amylose et amylopectine) dans les plastes**
 - **hydrolyse** : enzyme de débranchement, amylases et α-glucosidase
 - **phosphorolyse** : enzyme de débranchement et amidon phosphorylase



B – Rappels sur le métabolisme énergétique

- ✓ **Glycolyse** : hexoses → pyruvate
→ faible production d'énergie (ATP) et de pouvoir réducteur (NADH)
- ✓ **Cycle de Krebs** : oxydation complète du pyruvate
→ grande quantité de pouvoir réducteur
- ✓ **Oxydations terminales** : transfert des e- de NADH/FADH₂ à O₂ couplé à un transfert de H⁺ transmembranaire
→ forte production d'ATP



C – Propriétés spécifiques des mitochondries végétales

- ✓ **NAD(P)H déshydrogénases insensibles à la roténone** :
→ contrôle du ratio NAD(P)/NAD(P)H dans le cytosol et régulation de voies de biosynthèse ?
- ✓ **Oxydase alternative (AOX) insensible au cyanure** :
→ peu ou pas d'ATP synthétisé : **production de chaleur** ; faible expression de AOX dans des conditions normales
- ✓ **stress biotiques et abiotiques** : forte expression de AOX
→ oxydation rapide des substrats respiratoires pour **réduire la tension en O₂** et ainsi limiter la production d'espèces activées de l'oxygène, toxiques pour la plante
- ✓ **floraison chez les Aracées** : fonctionnement de la voie AOX dans le spadice → augmentation de la température jusqu'à 35-45°C (**thermogenèse**) → volatilisation de composés qui vont attirer des insectes pollinisateurs

