

CHAP. 2 – LA NUTRITION HYDRIQUE

1. Importance de l'eau pour la plante

2. L'absorption de l'eau par la plante
3. Le transit de l'eau dans la plante
4. L'émission d'eau par la plante

Rôle de l'eau : la turgescence cellulaire

- permet le déroulement du métabolisme
 - contribue au port des végétaux
- } turgescence cellulaire
- véhicule les substances nutritives, hormones et déchets du métabolisme
 - commande certains mouvements d'organes

TENEUR EN EAU DES VEGETAUX

Valeurs moyennes par rapport à la matière sèche en %

- Feuilles de **pommier** 150
- Feuille de **blé** (en herbe) 300
- Feuilles de **chou** 600
- Feuilles de **tomate** 700
- **Jeunes racines, tubercules** 2 000
- **Graines et spores** 10
- **Troncs d'arbres** 100

Besoins en eau très importants

A poids égal,

une plante consomme en 24 h,

10 fois la quantité d'eau bue par un animal.

Explication :

90% de l'eau prélevée dans le sol par la plante ne fait que transiter → **transpiration**

DEFICIT LETAL

- Valeur critique du déficit hydrique au-delà de laquelle la vie n'est plus possible
 - Valeur remarquablement élevée chez les végétaux :
 - ☐ 30 % pour le haricot
 - ☐ 40 % pour le maïs
 - ☐ 70 % pour la luzerne
 - ☐ Plantes reviviscentes (Bryophytes, Lichens)
- minimum biologique 10%**

1. Importance de l'eau pour la plante

2. L'absorption de l'eau par la plante

2.1. Les organes de l'absorption

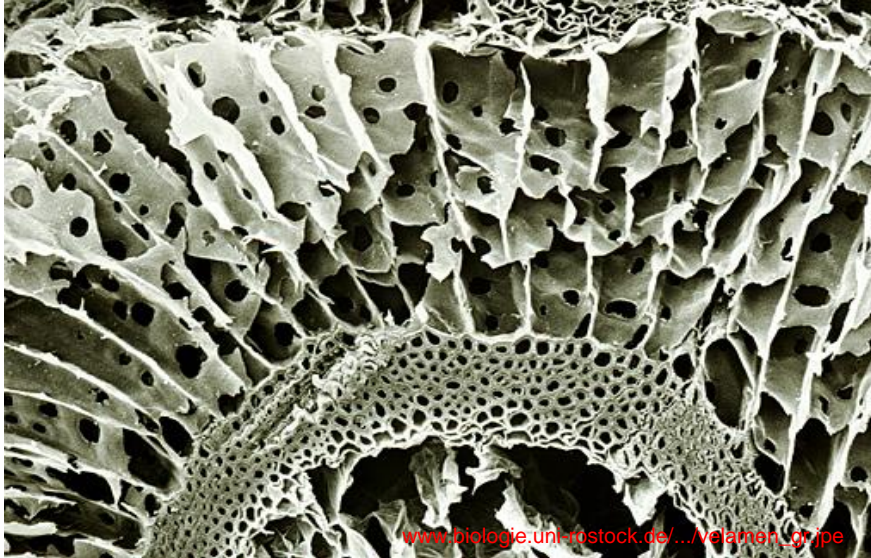
2.2. La notion de potentiel hydrique

2.3. Mécanisme de l'absorption

3. Le transit de l'eau dans la plante

4. L'émission d'eau par la plante

Les racines aériennes des orchidées



Phalenopsis

Les racines des fougères épiphytes



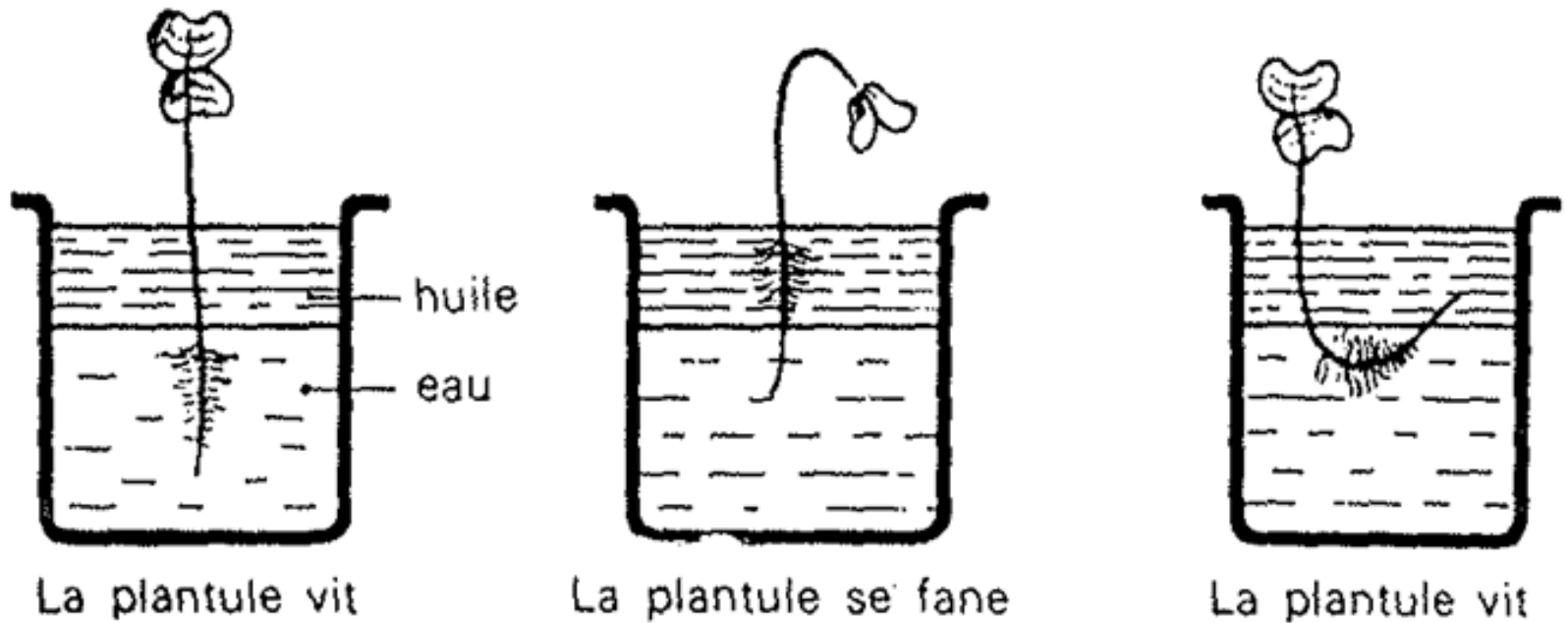
www.anbg.gov.au/platycerium_bifurcatum.html

Lorsque les feuilles de la plante meurent, elles restent en place, attachées à la base de la plante. Ainsi les feuilles mortes s'accumulent et finissent par constituer de l'humus, capable de piéger et de stocker eau et éléments nutritifs. Les racines de la plante peuvent ainsi pénétrer dans cette réserve d'humus, qui fonctionne comme une éponge susceptible de recueillir des litres d'eau.

Le rôle des poils absorbants

L'expérience de Rosène

(Hilda F. ROSENE, 1950)



*La plantule absorbe l'eau
essentiellement par ses poils absorbants (plantule de Radis).*

1. Importance de l'eau pour la plante

2. L'absorption de l'eau par la plante

2.1. Les organes de l'absorption

2.2. La notion de potentiel hydrique

2.3. Mécanisme de l'absorption

3. Le transit de l'eau dans la plante

4. L'émission d'eau par la plante

Disponibilité en eau du sol

- teneur en eau du sol \neq disponibilité en eau du sol pour les plantes
- eau liée \neq eau libre
- eau soumise à des interactions plus ou moins forte avec les molécules avoisinantes

LES FORCES DE RETENTION DE L'EAU DANS LE SOL

générées par les éléments
solubles du sol



- Les forces osmotiques
- Les forces d'imbibition
- Les forces de capillarité

Forces
matricielles



générées par les éléments
non solubles du sol

Gravité

≠

Forces
de
rétention

Enthalpie de sorption

A cause de l'intensité des forces de rétention

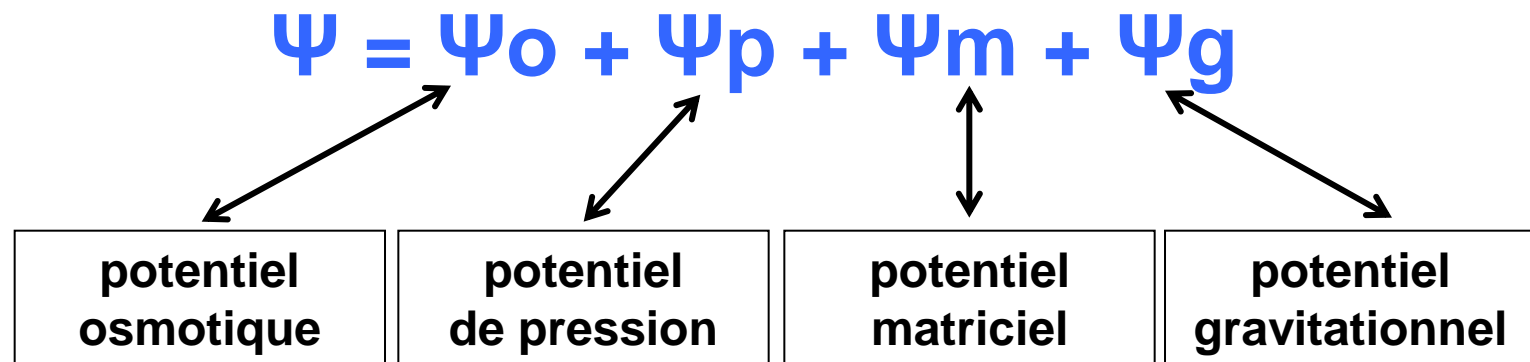
=> **Quantité d'énergie à fournir par la plante pour rompre les liaisons retenant l'eau du sol**

Enthalpie de sorption

sorption = processus par lequel une substance est adsorbée ou absorbée sur ou dans une autre substance

La notion de potentiel hydrique

C'est l'énergie fournie par la plante pour prélever l'eau du sol



La notion de potentiel hydrique

$$\Psi = \Psi_o + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g$$

Ψ_o = associé à la concentration en solutés ; égal à la valeur absolue de la pression osmotique ; toujours affecté du signe – car solutés diminuent enthalpie libre

$\Psi_o = 0$ dans l'eau pure

Ψ_p : dépend de la pression hydrostatique ; positif si pression ; négatif si dépression

$\Psi_p = 0$ à la pression atmosphérique
en général : $3 \leq \Psi_p \leq 8$ bars

Ψ_m : souvent négligeable ; négatif

$\Psi_p = 0$ à la pression atmosphérique
en général : $3 \leq \Psi_p \leq 8$ bars

$\Psi_g = \rho g h$; souvent négligeable (sauf si arbre ≥ 10 m où $\Psi_g \geq 0$)

Par simplification :

$$\Psi = \Psi_o + \Psi_p$$

La notion de potentiel hydrique

$$\Psi = \Psi_o + \Psi_p$$

Unités : joules m⁻³ ; Pascal Pa ; atm ; bar

nom	symbole	équivalence
Pascal	Pa	
Joules par m3	J m ⁻³	1 Pa
Bar	bar	100 000 Pa
Atmosphère	atm	101 325 Pa

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

soit 1 MPa = 10 bar ≈ 10 atm

La notion de potentiel hydrique

- Ψ est **toujours négatif**.
- **Plus il est bas et plus la liaison de l'eau est forte.**
- Mouvement d'eau **spontané du potentiel hydrique le moins négatif vers le plus négatif**
donc du plus proche de zéro = Ψ de l'eau pure vers le plus négatif = Ψ de l'eau la plus fortement liée.
- Ψ détermine donc **le sens des mouvements d'eau**:
 - **entre le sol et la plante**
 - **entre la plante et l'atmosphère**
 - **entre les différentes parties de la plante**

La notion de potentiel hydrique

Exemples de valeurs de potentiel hydrique

- **-7 bars : bulbes d'oignon, racine de carotte, feuille d'épinard ...**
- **-50 à -100 bars : cactées, crassulacées (peu de pertes d'eau en milieu aride)**

La notion de potentiel hydrique

- Ψ mesure l'**avidité en eau** d'un compartiment
- Plus une solution à l'intérieur d'un compartiment est concentrée plus elle attire l'eau donc plus le potentiel hydrique du compartiment est bas (donc très négatif).
- **opposé de la succion S : $\Psi = - S$**

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
 - 2.1. Les organes de l'absorption
 - 2.2. La notion de potentiel hydrique
 - 2.3. Mécanisme de l'absorption**
3. Le transit de l'eau dans la plante
4. L'émission d'eau par la plante

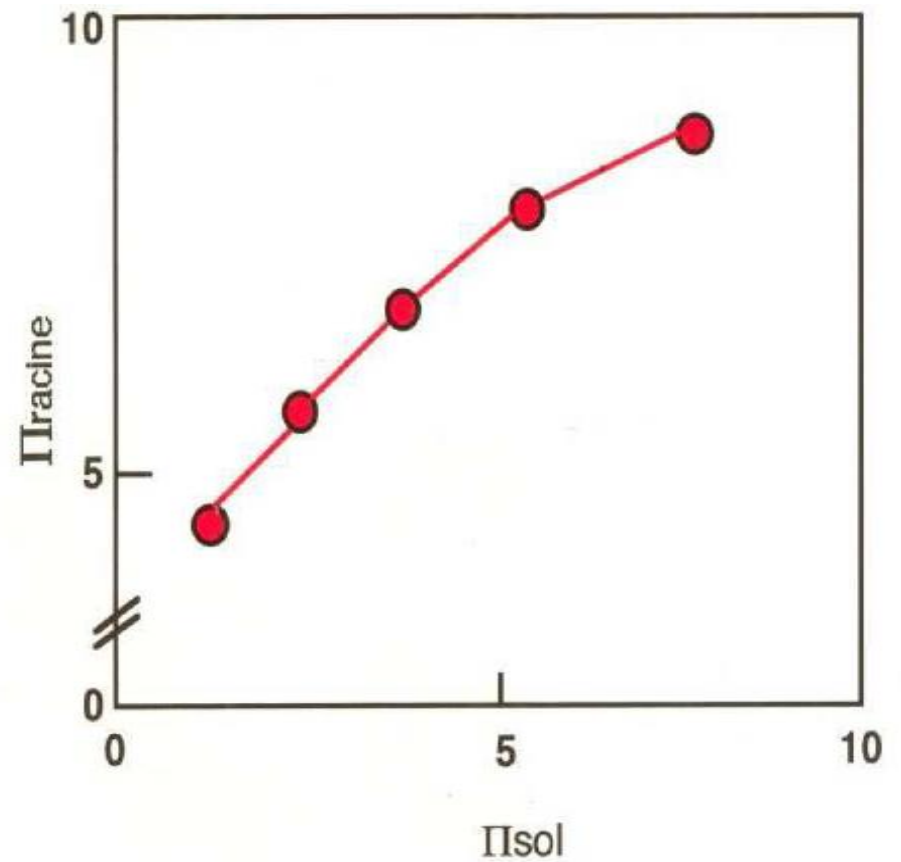
Les mécanismes de l'absorption

- **Hypertonie des cellules absorbantes**
→ mécanisme de régulation pour rétablir l'hypertonie = **l'épictèse**
- **Succion exercée par les parties aériennes**
→ appel d'eau transmis tout le long de la tige
- **Activité physiologique de la racine**
→ absorption impossible si anoxie

Effet de l'augmentation de la pression osmotique du sol sur la pression osmotique des racines de maïs.

D'après Mc COOL et MILLAR, 1917

Pression osmotique (Bars)	
Solution du sol	Racines
1,21	4,59
1,99	5,48
3,38	6,61
4,96	7,51
7,22	8,19



Les mécanismes de l'absorption

L'absorption dépend de la succion nette S

$$S = S_i - S_e$$

avec :

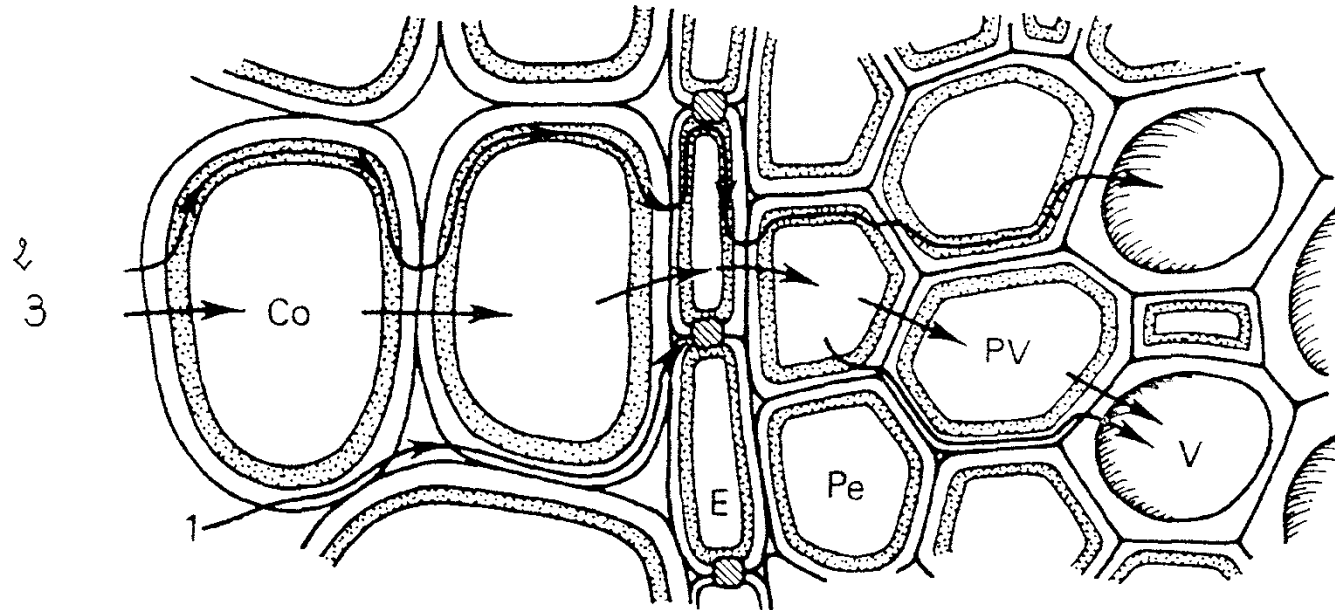
S_i = succion exercée sur l'eau par la plante

S_e = succion exercée sur l'eau par le sol

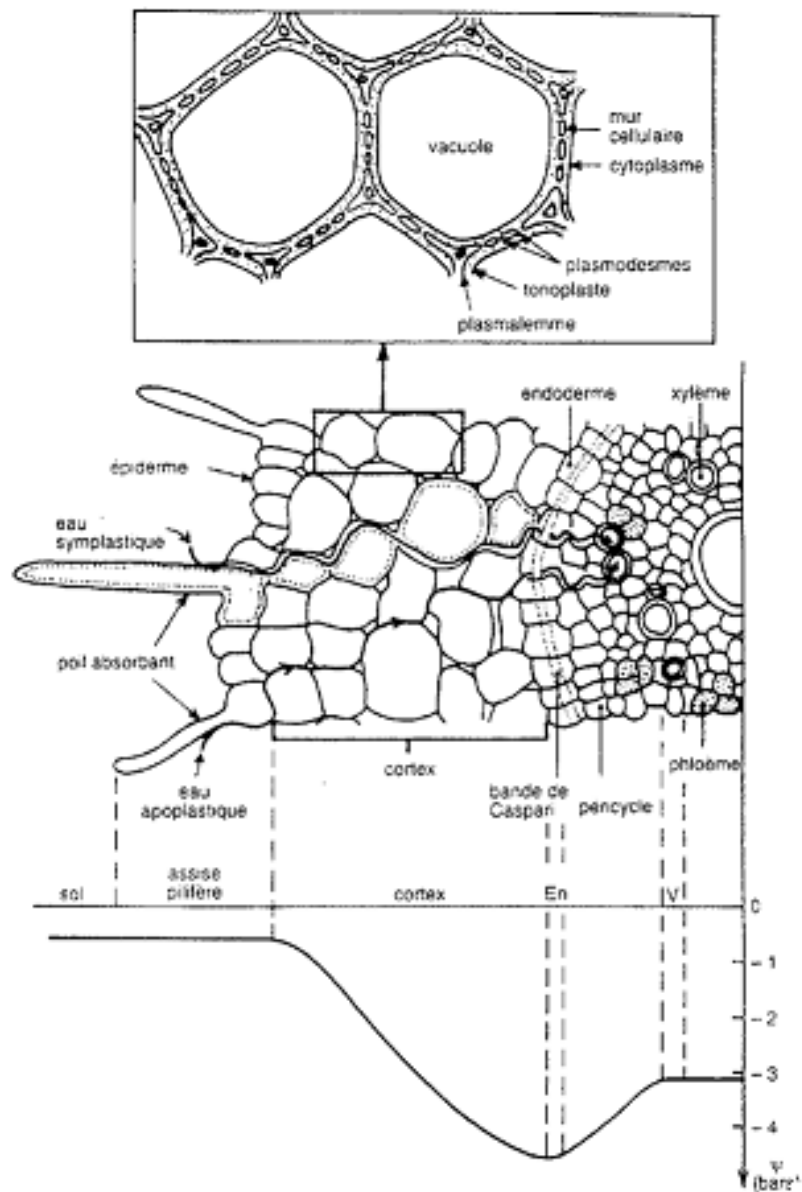
***Une succion nette positive implique
un potentiel hydrique de la plante
inférieur à celui du sol***

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
- 3. Le transit de l'eau dans la plante**
 - 3.1. Le transit dans la racine**
 - 3.2. La circulation des sèves
 - 3.2.1. La sève brute
 - 3.2.2. La sève élaborée
4. L'émission d'eau par la plante

TRANSIT DE L'EAU



Trajets possibles pour l'eau : 1) voie apoplasique; 2) voie symplasmique; 3) de vacuole à vacuole. La voie apoplasique est interrompue à l'endoderme (par le cadre subérifié), mais peut se reconstituer au-delà. Co, cellule du cortex; E, endoderme; Pe, péricycle; PV, parenchyme vasculaire; V, vaisseau.



Étude d'une racine dans la région où s'effectuent les absorptions de sels minéraux et d'eau.

coupe transversale et courbe de l'évolution des potentiels hydriques. Ultérieurement, les parois des cellules endodermiques s'épaississent fortement à l'exception de celles opposées aux rayons du xylème.

En, endoderme ; V, vaisseaux du xylème.

(d'après MAZLIACK)

1. Importance de l'eau pour la plante

2. L'absorption de l'eau par la plante

3. Le transit de l'eau dans la plante

3.1. Le transit dans la racine

3.2. La circulation des sèves

3.2.1. La sève brute

3.2.2. La sève élaborée

4. L'émission d'eau par la plante

La composition de la sève brute

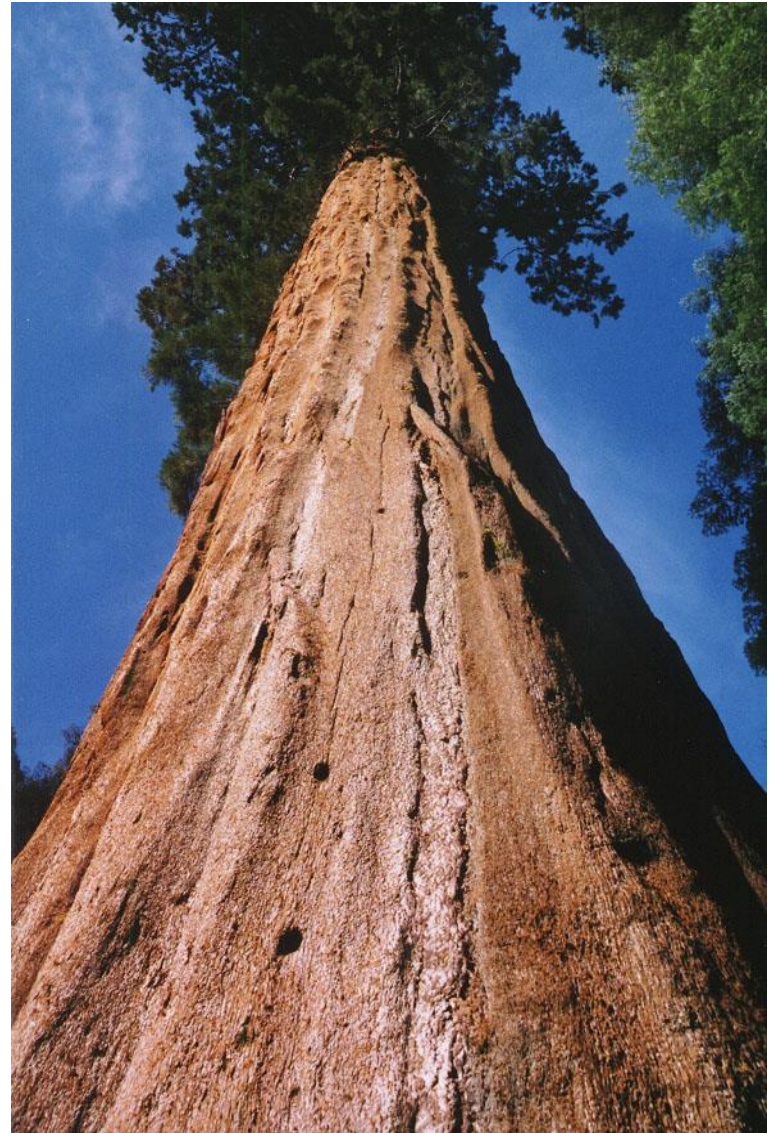
Composition de la sève brute du poirier, à deux périodes de l'année. (Les concentrations sont données en parties par million.)
(D'après Anderssen 1929.)

Constituants	Novembre	Mai
Ca ²⁺	16,6	84,7
Mg ²⁺	0,8	23,5
K ⁺	23,6	59,6
Fe ²⁺	1	2,1
So ₄ ²⁻	8,3	31,8
Cl ⁻	3,2	4,5
PO ₄ ³⁻	10,6	25,2
Saccharose	80	0
Sucres réducteurs	40	0
Composés azotés	20	160

Les plus grands arbres (Séquoia) atteignent ~ 100 m

Trois forces contribuent à faire monter l'eau:

1. Capillarité
2. Pression racinaire
3. Aspiration foliaire



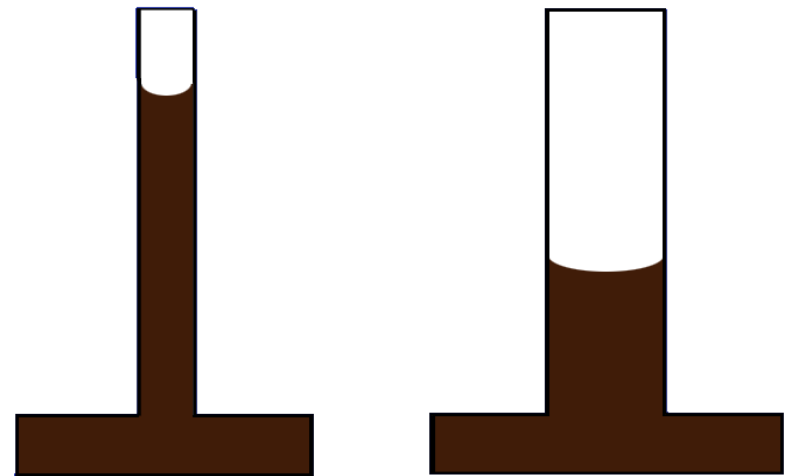
d'après Gilles Bourbonnais Cégep de Sainte-Foy

1. Capillarité

- Due à la cohésion des molécules d'eau entre elles (cohésion grâce aux liaisons hydrogène) et avec la paroi des vaisseaux conducteurs.
- Montée **inversement** proportionnelle au diamètre du tube.
- Ne peut pas monter plus haut que 1,5 m dans les plus petites trachéïdes.

Les molécules d'eau adhèrent entre elles (cohésion par les liaisons hydrogène).

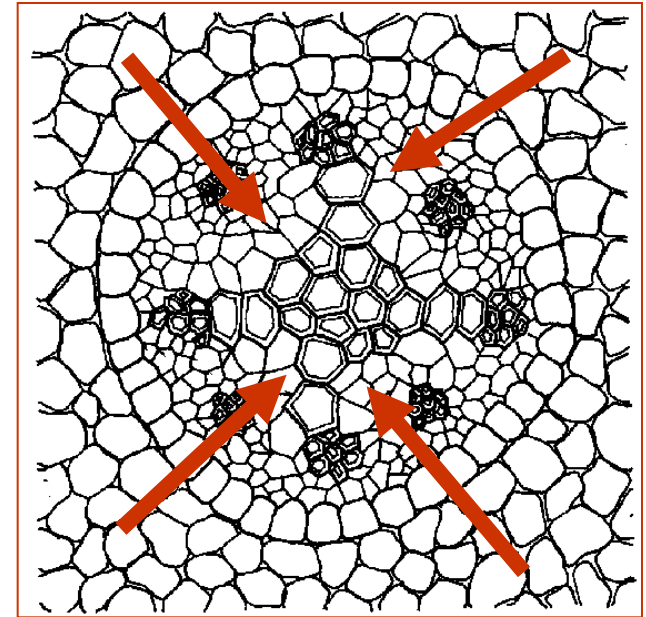
Si on « tire » sur une molécule, les autres suivent.



2. Pression racinaire

Transport de minéraux dans la racine :

- Augmente la concentration à l'intérieur du cylindre central.
- L'eau se déplace alors vers le cylindre central et pénètre dans le xylème par osmose ; l'eau arrive sous pression :



Transport de minéraux dans le cylindre central

pression racinaire = poussée radiculaire.

La poussée radiculaire joue un rôle important dans la montée de sève. Si il n'y avait pas les forces de frottements, elle pourrait théoriquement expliquer l'ascension de la sève dans les arbres les plus hauts (1 bar → 10 m).

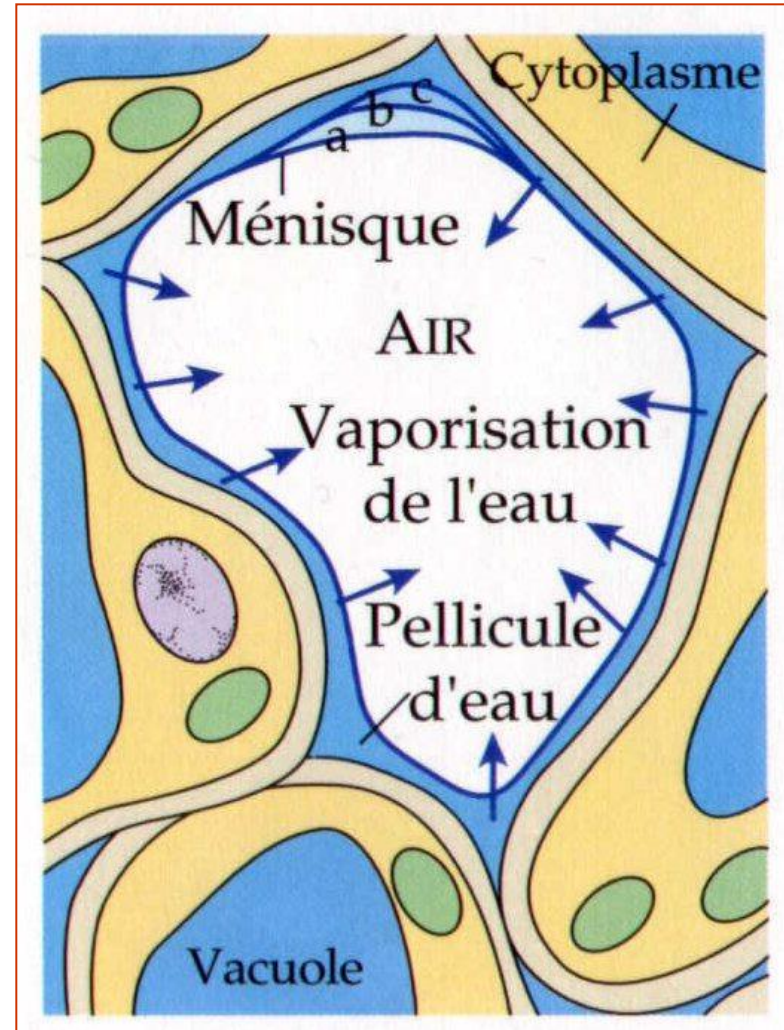
3. Aspiration foliaire = transpiration

En surface des feuilles, les vaisseaux conducteurs sont recouverts d'une pellicule d'eau ; l'interface air/eau forme donc un ménisque.

Lorsque la plante transpire, la pellicule d'eau s'évapore.
=> la pellicule d'eau se rétracte.

La pellicule d'eau qui se rétracte, « tire » sur l'eau provenant du xylème. Il se crée sous le ménisque des forces de tension superficielle qui attirent toute la colonne d'eau (comme dans un capillaire).

Il se crée donc une **tension** dans le xylème.



Rayon de courbure en μm	Pression hydrostatique en MPa
c = 1,00	- 0,15
b = 0,10	- 1,50
a = 0,01	- 15,0

- Pour soutenir une colonne d'eau de 120 m, le rayon d'évaporation du ménisque doit être $\leq 0,12 \mu\text{m}$ (millième de mm).
- Or les ménisques sur les réseaux de microfibrilles de cellulose auraient un rayon de 2 à 4 millièmes de micromètres seulement !
- La transpiration = mécanisme essentiel de la montée de sève

- Vitesse moyenne de circulation de la sève brute = 1 à 6 m/heure
- Si transpiration importante
Vitesse de circulation de la sève brute peut atteindre 100 m/heure

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
3. Le transit de l'eau dans la plante
 - 3.1. Le transit dans la racine
 - 3.2. La circulation des sèves
 - 3.2.1. La sève brute
 - 3.2.2. La sève élaborée**
4. L'émission d'eau par la plante

La composition de la sève élaborée

Compositions des sèves brute et élaborée du xylème et du phloème de lupin (*Lupinus albus*).

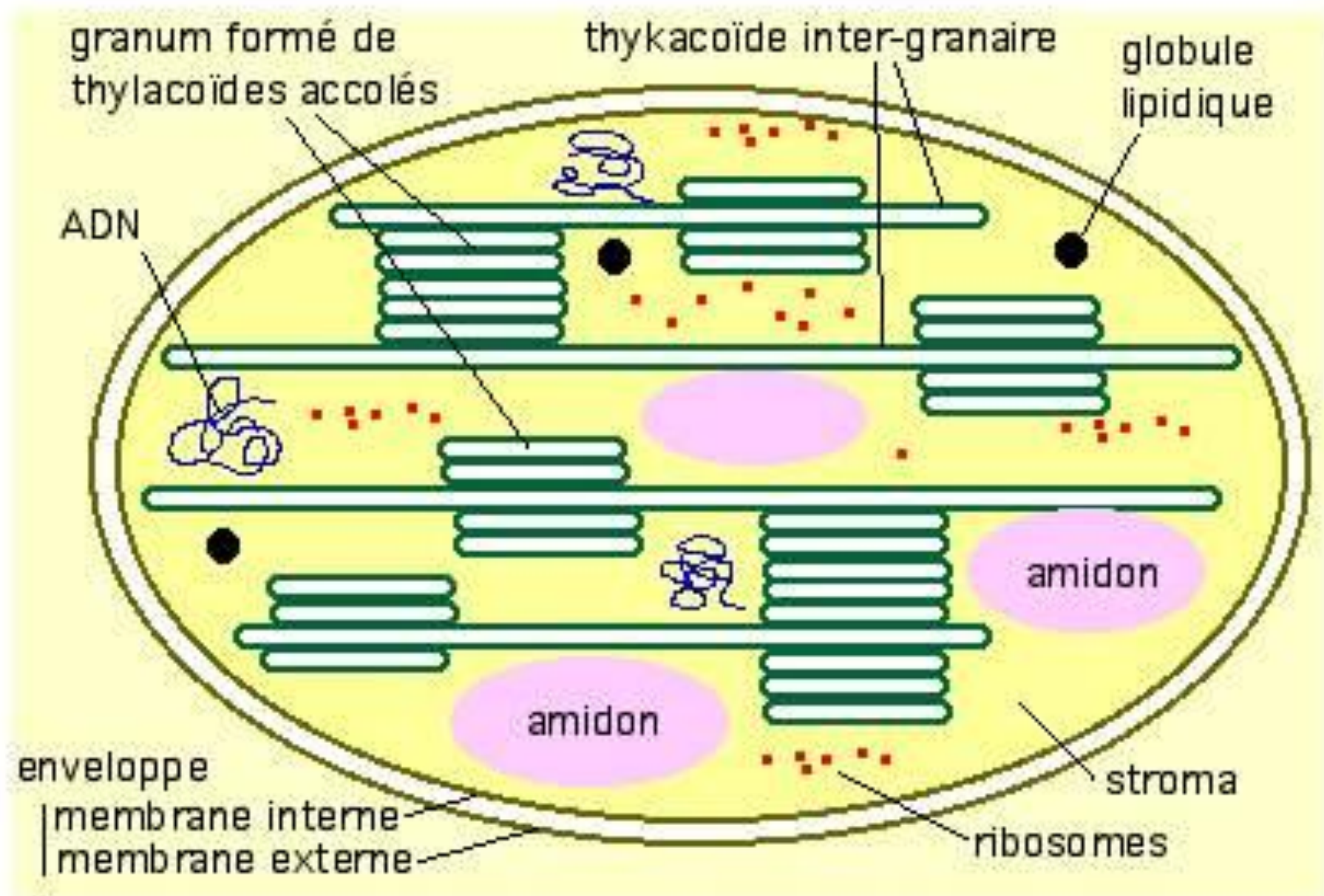
	Sève brute ($\mu\text{g. ml}^{-1}$)	Sève élaborée ($\mu\text{g. ml}^{-1}$)
pH	6,3	7,9
Nitrate	10	0
Cuivre	traces	0,4
Zinc	0,4	5,8
Manganèse	0,6	1,4
Fer	1,8	9,8
Calcium	17	21
Magnésium	27	85
Sodium	60	120
Potassium	90	1 540
Acides aminés	700	13 000
Saccharose	0	154 000

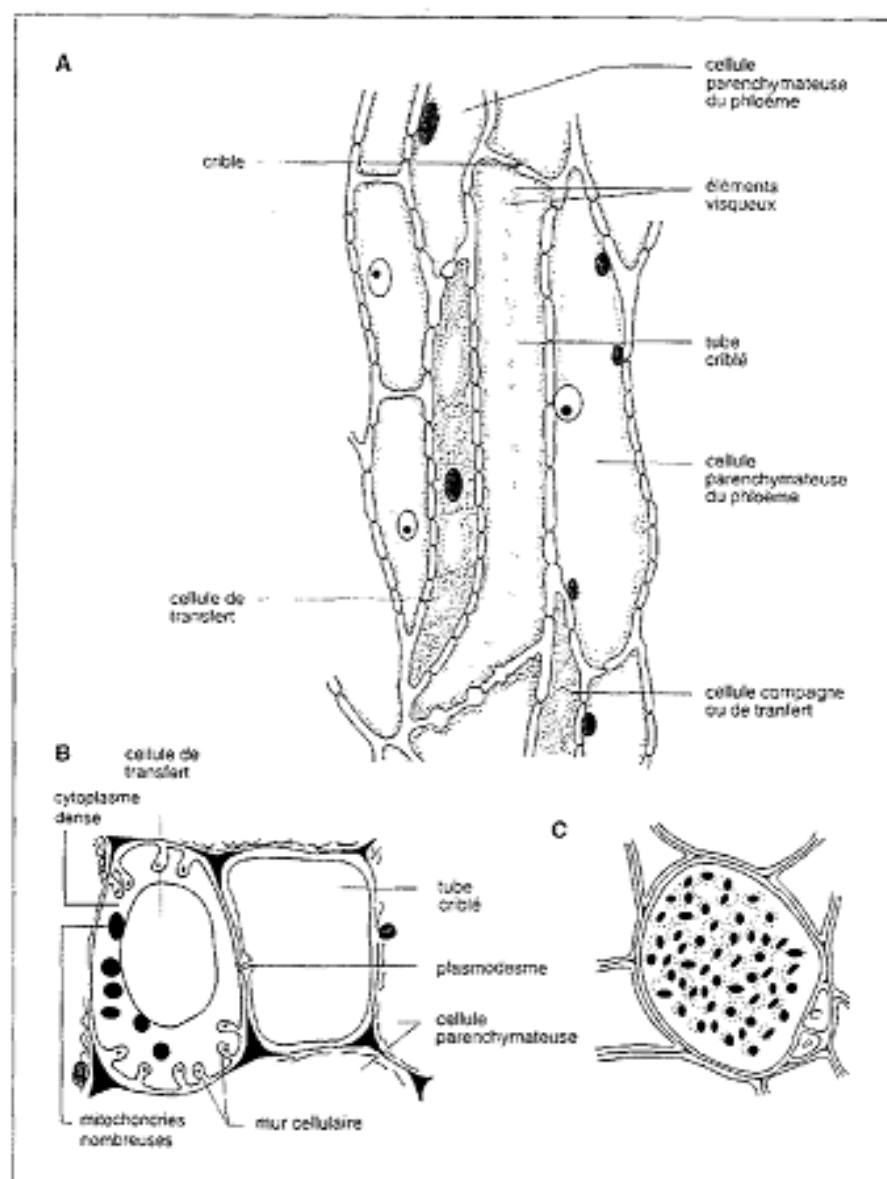
Transport de la sève élaborée dans le phloème

Se fait d'un **organe source** à un **organe cible** ou **puits**

- **Organe source** : produit des glucides
- **Organe puits** : utilise ou met en réserve les glucides (fruit ou racine par exemple)

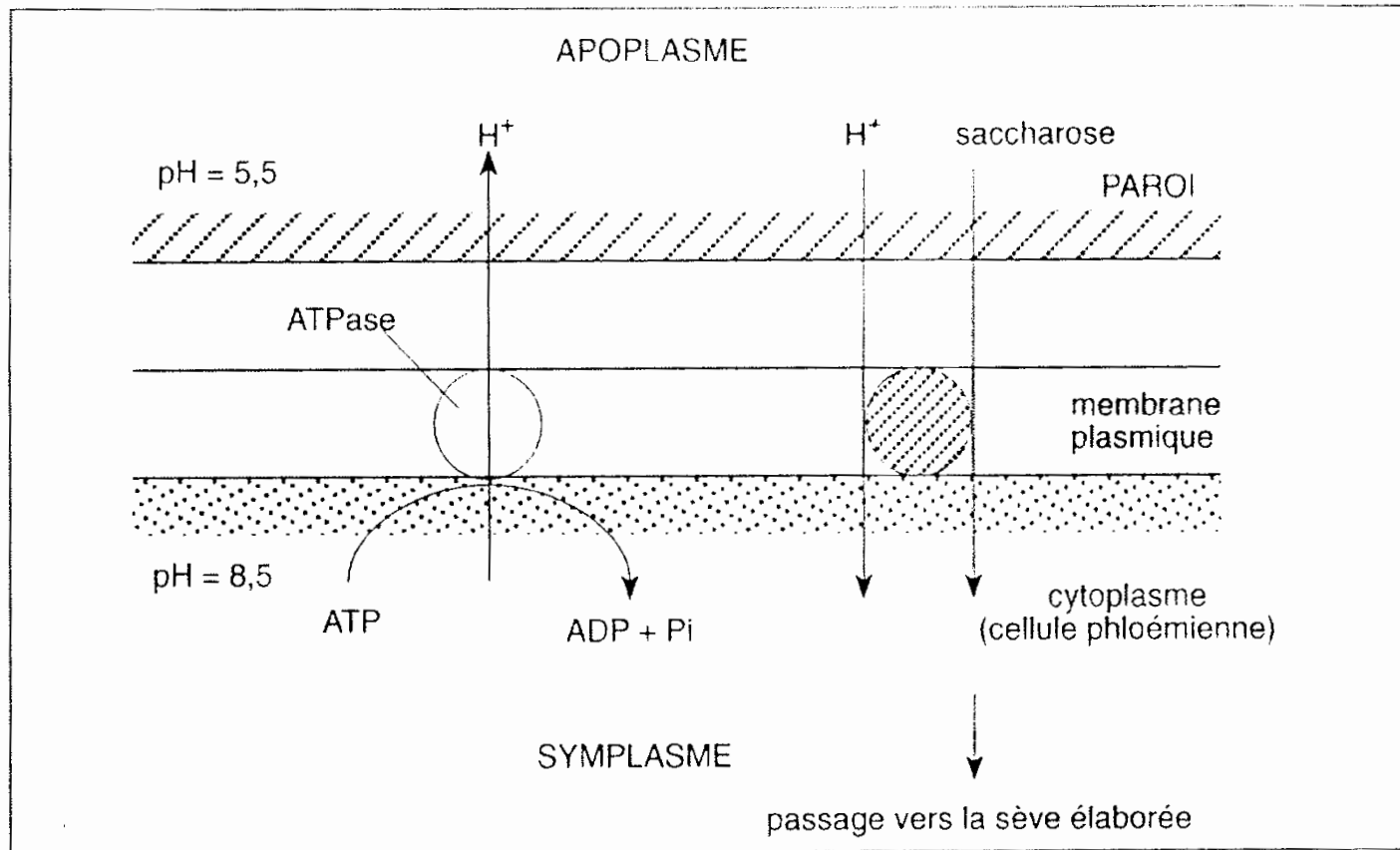
N.B. Un tubercule peut être un organe source ou puits selon la saison.





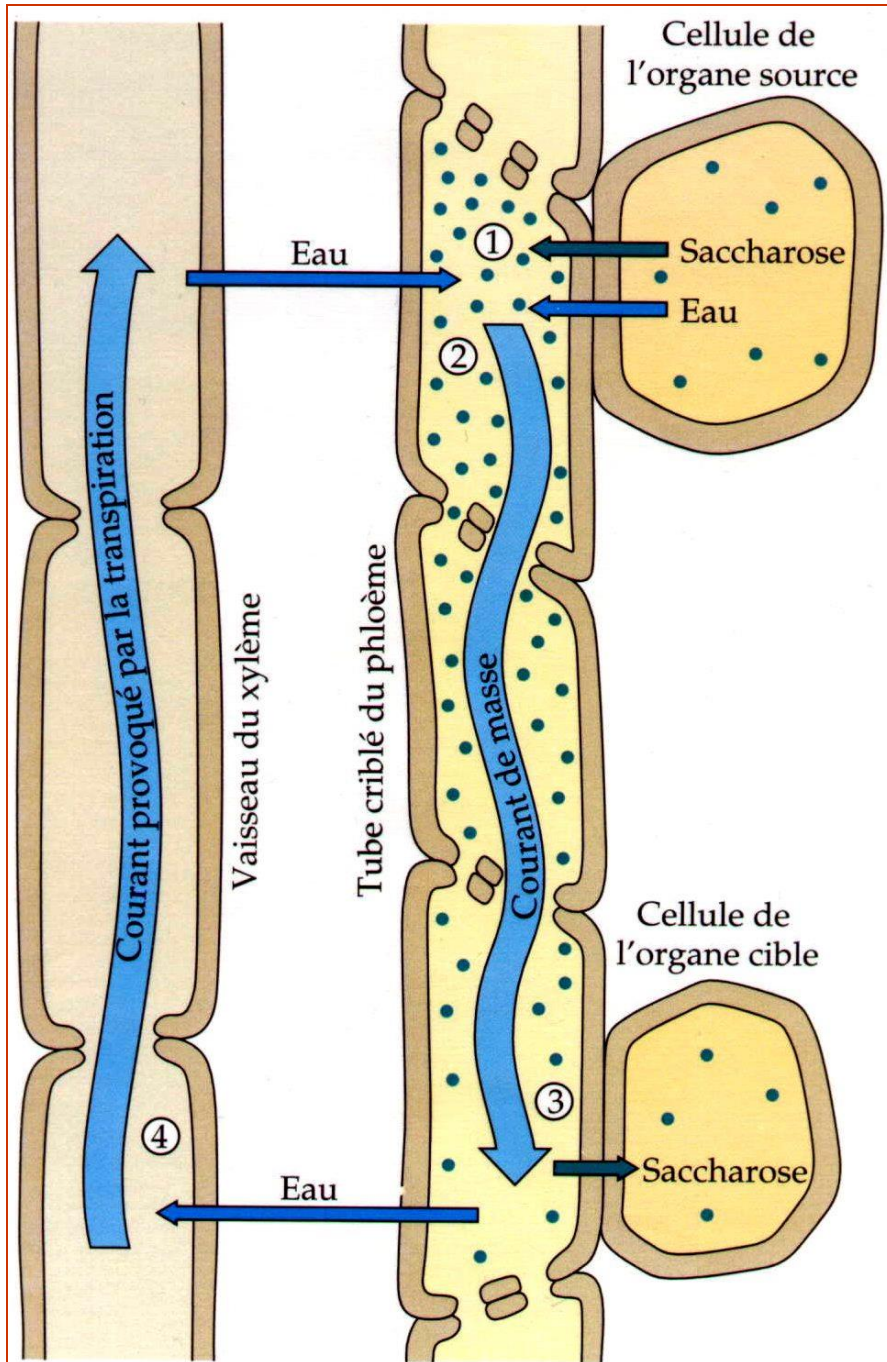
Représentation d'une coupe longitudinale dans le phloème (A) montrant une cellule de transfert de cytoplasme dense et très riche en mitochondries, située entre une cellule parenchymateuse, où s'effectue la photosynthèse et un tube criblé dans lequel on note la présence de filaments visqueux. Coupe à travers une cellule de transfert et un tube criblé (B). Vue de face d'un crible (C).

(D'après Salisbury & Ross 1985.)



Chargement apoplastique du phloème.

(D'après Robert & Catesson 1990.)



Hypothèse de la circulation des sèves selon la théorie de Münch et Crafts

Transport actif de saccharose dans les cellules du phloème.

L'eau suit par osmose.

La force qui déplace l'eau vient du transport actif des glucides (ATP).

Le saccharose passe du phloème à l'organe cible.

L'eau sort du phloème par osmose.

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
3. Le transit de l'eau dans la plante
4. L'émission d'eau par la plante

4.1. La guttation

4.2. La transpiration

4.2.1. Généralités

4.2.2. Facteurs de variation

4.2.3. La régulation stomatique

4.2.4. La lutte contre le stress hydrique

La pression racinaire peut entraîner dans certains cas la **guttation**.



L'eau perle le matin ou au crépuscule, au niveau des feuilles.

Le phénomène ne se produit que si :

absorption > transpiration

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
3. Le transit de l'eau dans la plante
4. L'émission d'eau par la plante
 - 4.1. La guttation

4.2. La transpiration

4.2.1. Généralités

4.2.2. Facteurs de variation

4.2.3. La régulation stomatique

4.2.4. La lutte contre le stress hydrique

La transpiration des végétaux : valeurs moyennes

- **Erable** isolé de **14m** de haut

Il possède environ **180 000 feuilles** soit pour leurs 2 faces une surface **700 m²**

En juillet en fin d'après-midi :

transpiration foliaire = 3,3 g/dm²/h

soit **pour l'arbre entier : 220 l/h**

La plus grande partie de la sève brute s'évapore donc au niveau des feuilles.

Un érable peut perdre ~ 220 L / h en été

donc

Il doit puiser 220 L / h dans le sol pour compenser.

**Transpiration / évaporation dans les forêts tropicales
joue un rôle important
dans la circulation de l'eau sur la planète
et dans le climat.**

- **Une plante en pot** de moyenne importance
par heure **2g**
- **Un plant d'avoine**
par jour **70g**
pendant 3 mois **22kg**
- **Un arbre isolé**
par jour **500kg**
pendant 6 mois de vie active **120t**
- **Une forêt de 1ha**
par jour **30t**
pendant un an **3000 à 4000t**

NOMBRE DE STOMATES (par mm²).
S : face supérieure; I : face inférieure.

<i>Espèce</i>	S	I	<i>Espèce</i>	S	I
Blé	33	14	Houx	0	170
Maïs	52	68	Lilas.....	0	330
Tomate	12	130	Pommier	0	300
Pomme de terre	50	160	Chêne rouvre	0	450
Luzerne.....	170	140	Peuplier	20	115

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
3. Le transit de l'eau dans la plante
4. L'émission d'eau par la plante
 - 4.1. La guttation
 - 4.2. La transpiration
 - 4.2.1. Généralités
 - 4.2.2. Facteurs de variation**
 - 4.2.3. La régulation stomatique
 - 4.2.4. La lutte contre le stress hydrique

- Nombre et position des stomates
- Surface de l'appareil foliaire : variations saisonnières ; adaptations foliaires (aiguilles...) ; maladies
- Nature et structure des tissus périphériques : cuticule, suber, parenchyme palissadique

Facteurs limitants

- **Etat du sol**

Abaisssement de l'humidité

Abaisssement de la température : $< 15^{\circ}\text{C}$

- **Etat de l'air**

- **Vent, turbulences, agitation de l'air**

- **Sécheresse de l'air**

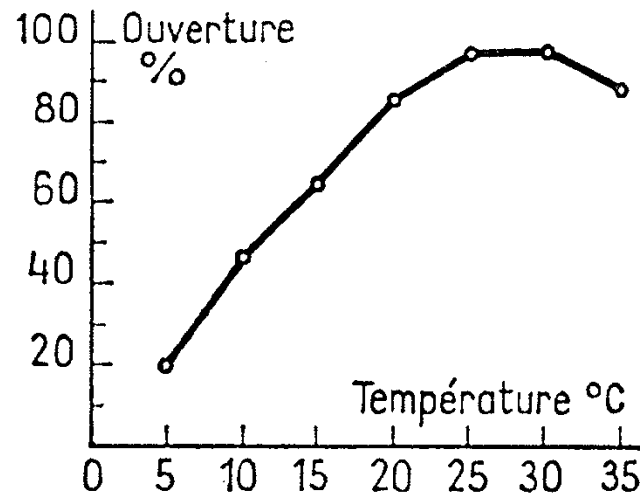
Seuil de tolérance : déficit hydrique = 10 à 15%

- **Température de l'air**

Seuil de tolérance : 25 à 30°C

- **Lumière**

Effet de la température sur l'ouverture des stomates (en % de l'ouverture maximale). Feuilles de Coton, lumière constante (d'après CH. C. WILSON, 1948).



Effets de la lumière sur la transpiration

- Par temps clair si soleil au zénith

Rayonnement solaire = $0,10 \text{ W/cm}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$

dont :

- 4 % dans l'UV
- **54 % dans le visible**
- 42 % dans l'IR

Effets de la lumière sur la transpiration

- **Que devient l'énergie solaire reçue ?**

Lumière réfléchie = 10 %

Lumière transmise = 27 %

Lumière absorbée = 63 %

par les **chloroplastes** : 30 %

par **l'eau (IR surtout)** : 15 %

par **diverses structures** : 18 %

Effets de la lumière sur la transpiration

- Les **63% absorbés** sont utilisés ainsi :

Photosynthèse = 1 %

Transpiration = 45 %

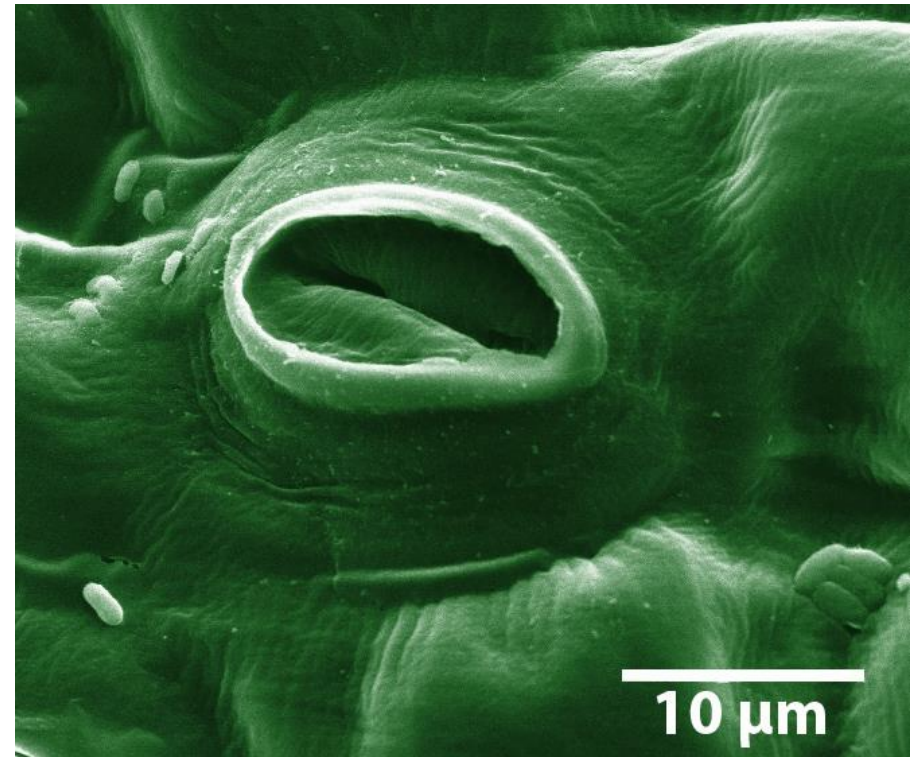
soit $\approx 70\%$ de l'énergie absorbée !

Pertes thermiques = 17 %

(échauffement de la feuille)

Effets de la lumière sur la transpiration

- Ouverture des stomates
- Radiations bleues

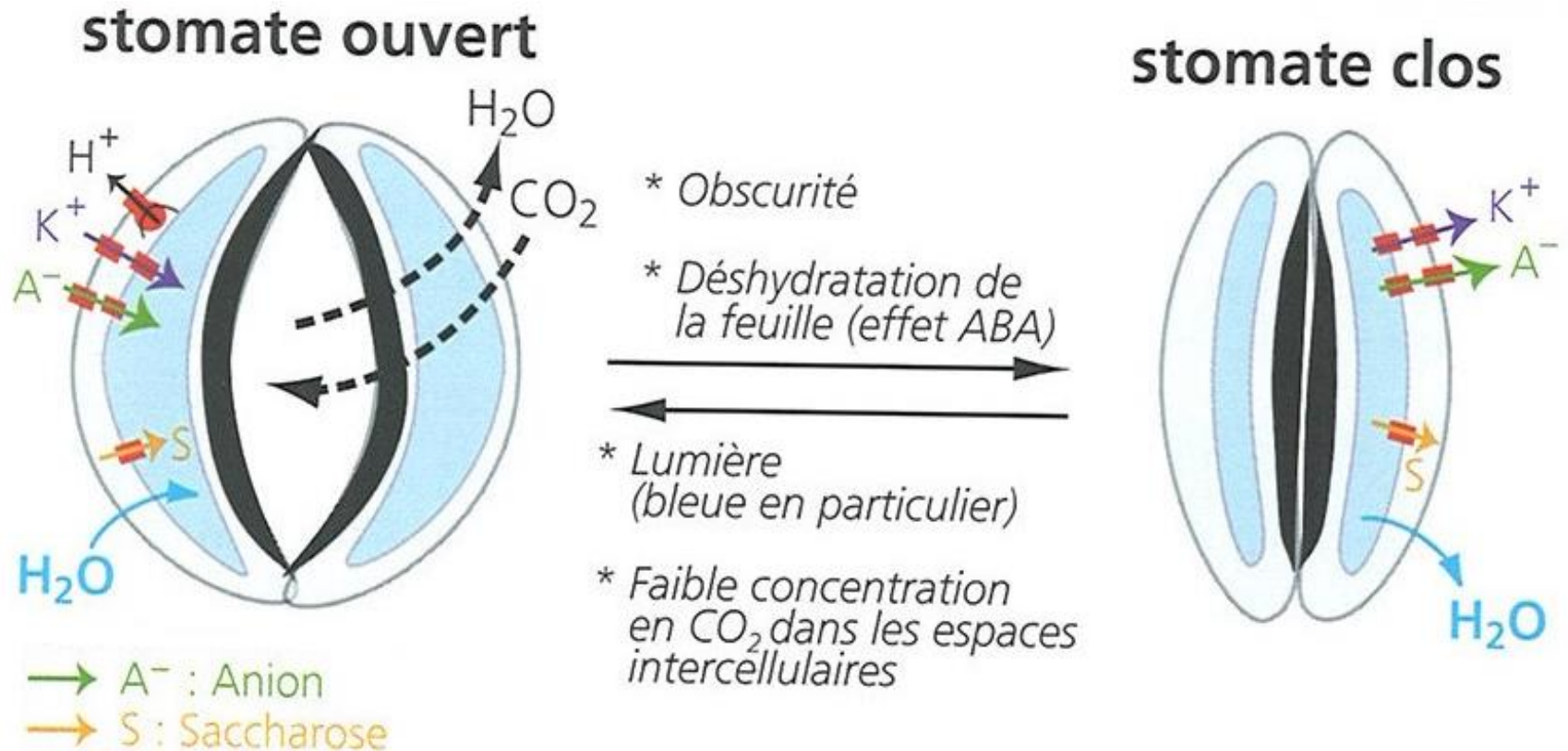


**Stomate d'une feuille de tomate
(observation en microscopie électronique)**

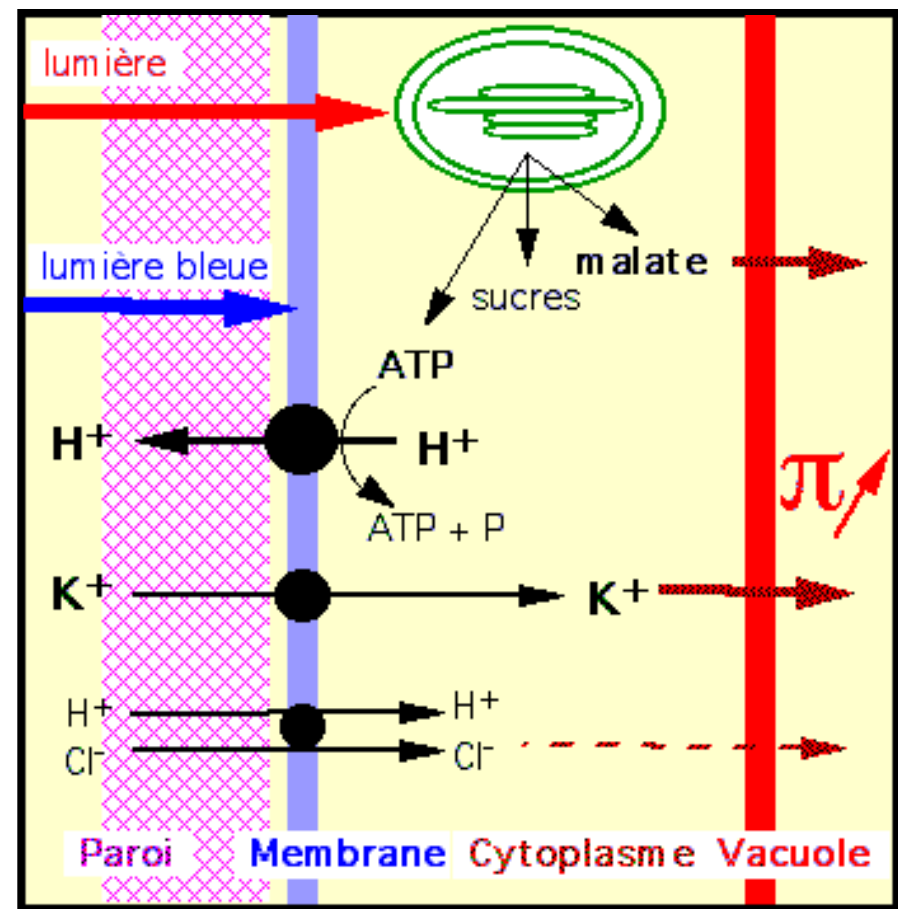
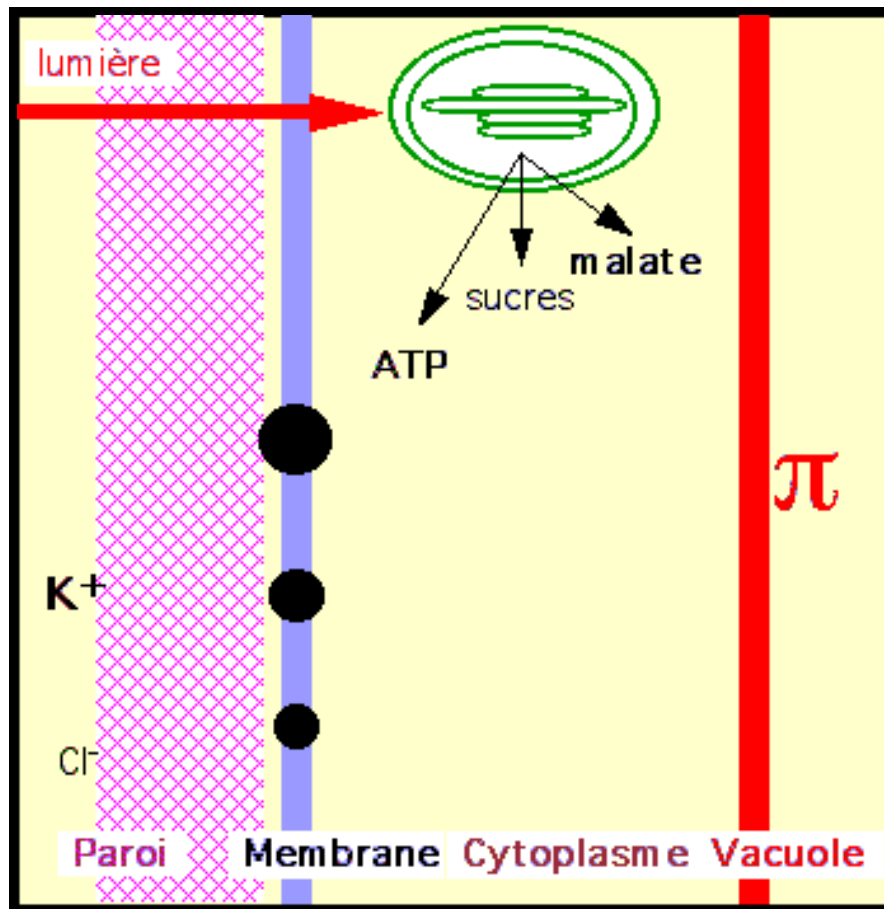
source photographique : <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiration>
License creative commons

1. Importance de l'eau pour la plante
2. L'absorption de l'eau par la plante
3. Le transit de l'eau dans la plante
4. L'émission d'eau par la plante
 - 4.1. La guttation
 - 4.2. La transpiration
 - 4.2.1. Généralités
 - 4.2.2. Facteurs de variation
 - 4.2.3. La régulation stomatique**
 - 4.2.4. La lutte contre le stress hydrique

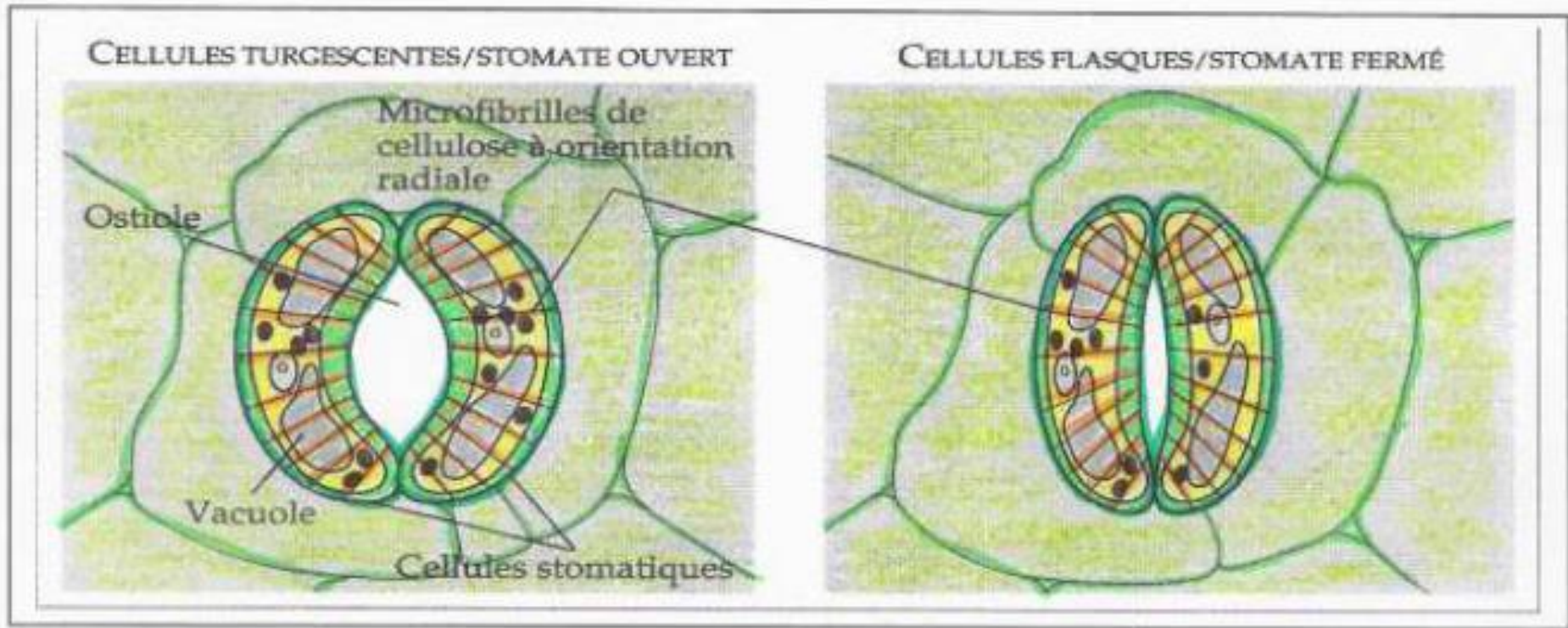
Mécanisme d'ouverture - fermeture des stomates



Mécanisme d'ouverture - fermeture des stomates



Mécanisme d'ouverture - fermeture des stomates



1. Importance de l'eau pour la plante

2. L'absorption de l'eau par la plante

3. Le transit de l'eau dans la plante

4. L'émission d'eau par la plante

4.1. La guttation

4.2. La transpiration

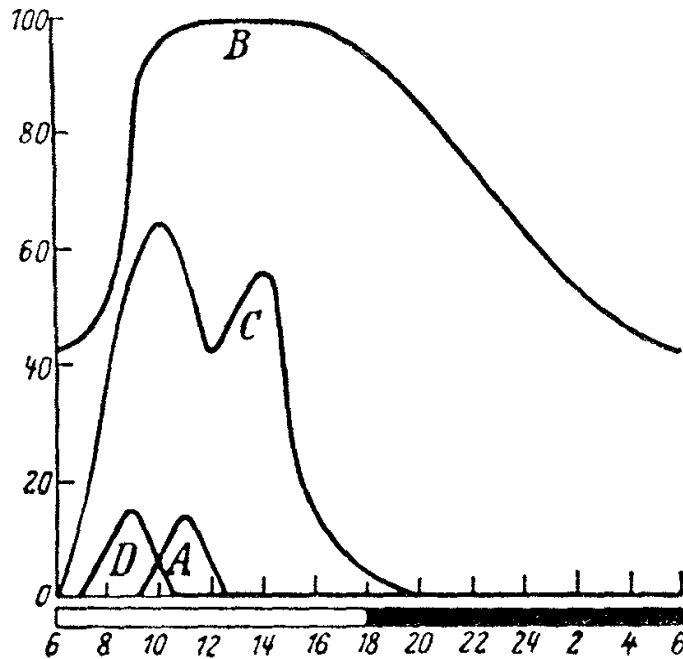
4.2.1. Généralités

4.2.2. Facteurs de variation

4.2.3. La régulation stomatique

4.2.4. La lutte contre le stress hydrique

Périodicité de l'ouverture des stomates

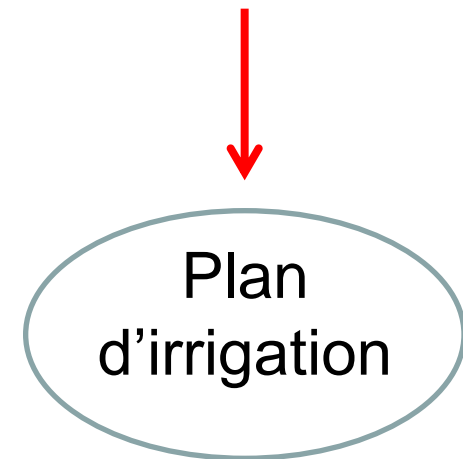
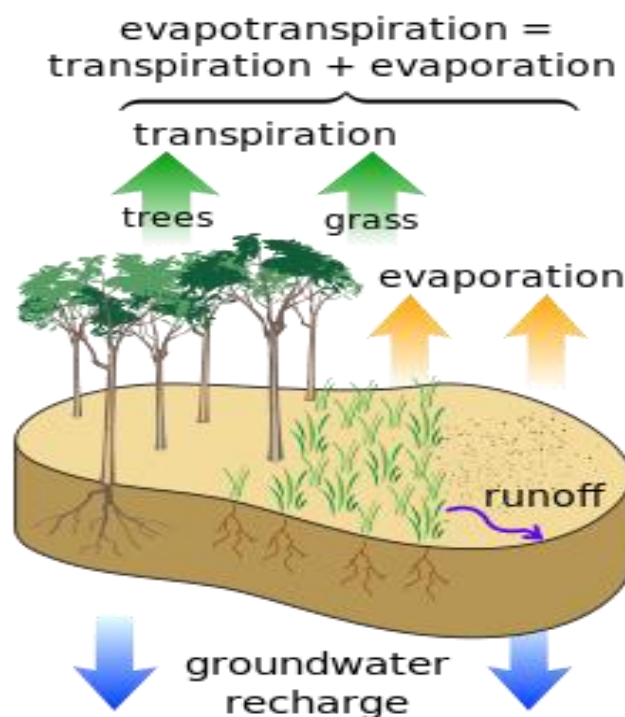


Ouverture des stomates: périodicité journalière (en % de l'ouverture maximale). A, journée d'automne froide et pluvieuse. B, journée d'été chaude et pluvieuse. C, journée d'été chaude et sèche. D, journée d'été très sèche (d'après STALFELT, 1929).

Applications agronomiques

Physiologie : alimentation hydrique

- **Meilleure maîtrise de l'irrigation**
 - **notion de RFU : Réserve en eau Facilement Utilisable**
 - **notion d'évapotranspiration maximale : ETM**



La notion d'évapotranspiration d'un écosystème / d'une culture

Source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89vapotranspiration> - License creative commons

Applications agronomiques

Physiologie : conduction des sèves

- **Amélioration de la productivité**
 - **meilleure maîtrise de l'irrigation et de l'apport d'engrais**
 - **sélection pour une meilleure distribution des assimilats vers les épis (ex. blé d'hiver)**
- **Optimisation des traitements phytosanitaires**
 - **recherche d'une bonne systémie = bonne aptitude des produits phyto à être transportés (= > réduction des quantités donc des coûts et des risques sanitaires)**