



Le transport de l'eau et des minéraux dans les végétaux

Victor Rouquayrol et Oumar Traoré

Biomécanique

Maitre de conférences : Patricia Cathalifaud



Comment l'eau circule des racines aux feuilles ?

Prenons le cas de la plante flétrie (figure 1). Si on l'arrose d'eau, le potentiel hydrique de la terre va augmenter. De ce fait, l'eau se déplacera vers les racines, induisant un gradient de potentiel hydrique. On définit le potentiel hydrique de la terre comme la force avec laquelle la terre retient les molécules d'eau.



Figure 1 : Flétrissement d'une plante

L'eau pénètre dans les cellules des racines par osmose, mais comment fait-elle pour se hisser jusqu'aux feuilles, face à la force de gravité ? Des scientifiques ont testé trois grandes hypothèses pour répondre à cette question :

1. La pression racinaire pourrait faire monter l'eau face à la gravité.
2. La capillarité pourrait faire monter l'eau dans le xylème.
3. La force de cohésion, une force générée dans les feuilles par la transpiration, pourrait faire monter l'eau des racines.

Laquelle de ces forces fait monter l'eau à la cime des arbres ? Pour répondre à cette question, commençons par examiner comment l'eau et les minéraux passent de la terre aux racines (xylème et phloème).

Mouvement de l'eau et des minéraux dans les racines

Pour comprendre comment l'eau pénètre dans une racine, observez la coupe transversale d'une jeune racine de bouton d'or (figure 2). Remarquons que plusieurs tissus distincts sont présents :

-L'épiderme (peau extérieure) est une couche unique de cellules. En plus de protéger la racine, elle produit des poils radiculaires, qui augmentent considérablement la surface totale de la racine.

- Le cortex est la région de tissu située entre l'épiderme et le tissu vasculaire dans les racines et les tiges des plantes.
- La fonction de l'endoderme (peau intérieure) est de contrôler l'absorption d'ions et d'empêcher la fuite d'ions du tissu vasculaire.
- Le péricycle ("autour du cercle") est une couche de cellules située à l'intérieur de l'endoderme qui forme la limite extérieure du tissu vasculaire.
- Les cellules conductrices du tissu vasculaire transportent l'eau et les nutriments entre les racines et les pousses et sont situées au centre des racines.

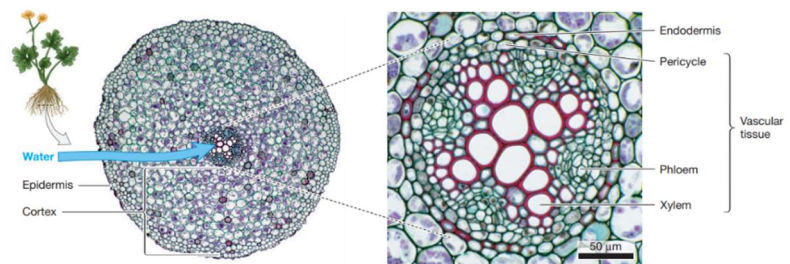


Figure 2 : Dans les racines, l'eau doit traverser plusieurs couches de tissus pour atteindre les tissus vasculaires.

Trois voies principales de la racine au xylème

Lorsque l'eau pénètre dans une racine, elle le fait grâce aux poils radiculaires. Au fur et à mesure que l'eau est absorbée, elle se déplace de la racine vers le xylème en suivant trois voies distinctes (figure 3).

La première voie est celle du symplasme dans la voie plasmatique.

La seconde est appelée transmembranaire.

La dernière est la voie apoplasmique qui se situe en dehors des membranes plasmiques. L'eau qui se déplace le long de cette voie doit traverser le cytoplasme des cellules endodermiques avant de pénétrer dans le xylème.

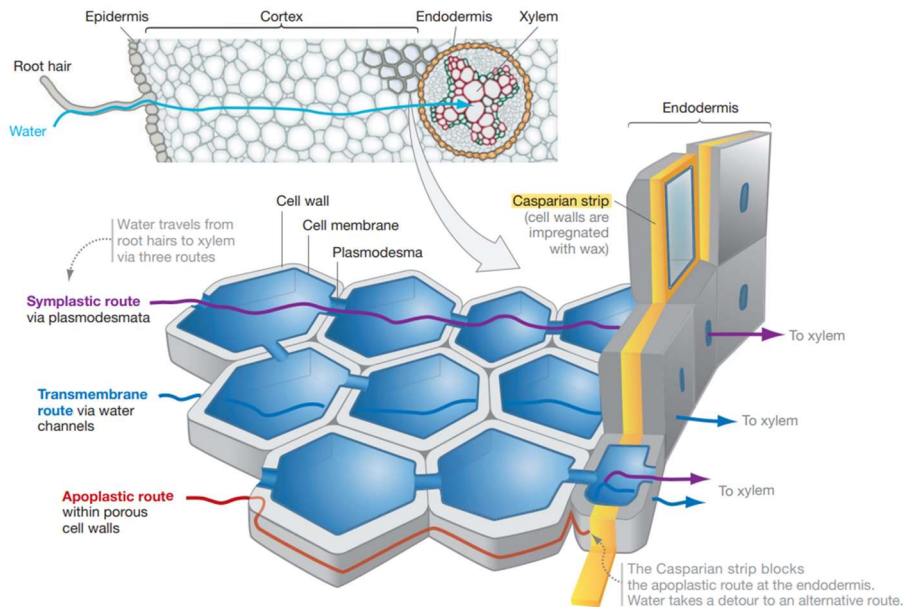


Figure 3 : La circulation de l'eau du poil racinaire au xylème en suivant trois routes

Le rôle de la bande de Caspary

Lorsque l'eau atteint l'endoderme un autre phénomène se produit. Les cellules endodermiques sont serrées les unes contre les autres et sécrètent une bande appelée "bande de Caspary".

C'est une barrière imperméable où les cellules endodermiques entrent en contact les unes avec les autres.

La bande de Caspary bloque la voie apoplasique en empêchant l'eau de traverser (figure 3). En revanche, la bande de Caspary n'affecte pas l'eau et les ions qui se déplacent par la voie symplastique.

Cette bande joue alors un rôle important car pour que l'eau et les minéraux atteignent le tissu vasculaire, ils doivent traverser une cellule endodermique.

Les cellules endodermiques, agissent comme des gardiens en régulant ce qui entre dans le xylème.

En obligeant l'eau et les ions à traverser au moins deux membranes sur leur parcours de la terre au xylème, les plantes contrôlent la qualité et la circulation de l'eau.

Les cellules endodermiques permettent, par exemple, aux ions potassium (K^+), de passer dans le tissu vasculaire. En revanche, elles limitent le passage d'ions nocifs ou de métaux lourds.

La circulation de l'eau par la pression racinaire

La circulation de l'eau et des ions dans le xylème est responsable de la pression racinaire.

On suppose que la pression racinaire est l'un des trois mécanismes pour faire monter l'eau de la racine aux feuilles.

La bande Caspary est essentielle au développement de la pression racinaire. Aussi, sans barrière apoplasique entre le xylème et l'environnement, l'eau et les minéraux s'échapperaient des racines.

Dans les feuilles, les stomates se ferment normalement pendant la nuit. En effet, le CO_2 n'est pas nécessaire et la photosynthèse n'a pas lieu. La fermeture des stomates ralentit le mouvement de l'eau dans les plantes.

Or, dans un même temps, les racines continuent à accumuler des minéraux, et ces nutriments sont activement pompés dans le xylème.

L'afflux de minéraux fait baisser le potentiel hydrique du xylème. Il devient alors inférieur à celui des cellules environnantes. Par conséquent, l'eau des cellules voisines pénètre dans le xylème.

Comme l'eau s'écoule dans le xylème, une pression positive est générée. La nuit, le fluide monte alors dans le xylème. La quantité d'eau qui pénètre dans les feuilles est ainsi supérieure à la quantité transpirée.

Dans certaines plantes, comme les fraises, on peut apercevoir des gouttelettes d'eau sur les feuilles. Ce phénomène s'appelle la guttation. A l'aube, si vous avez déjà marché pieds nus dans l'herbe, vous aurez les pieds mouillés. L'eau qui vous aura mouillé a passé une partie de la nuit à se déplacer dans la plante (figure 4).

Les scientifiques ont longtemps pensé que la pression induite par les racines était la seule raison pour laquelle l'eau circulait des racines aux feuilles.

Cependant, des recherches ont montré que sur de longues distances, comme des racines à la cime d'un séquoia, la force de pression des racines n'était pas suffisante pour vaincre la force de gravité.

La conclusion est qu'il devait y avoir un autre mécanisme impliqué dans le transport de l'eau sur de longues distances.

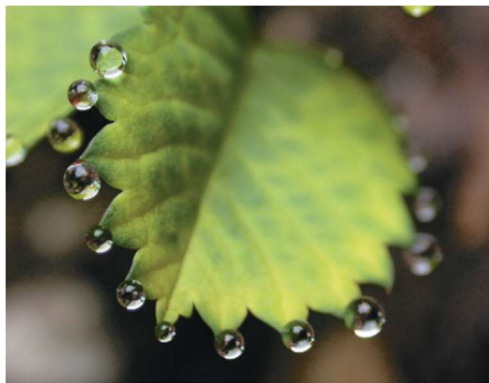


Figure 4 : Phénomène de guttation

La circulation de l'eau par capillarité

Les chercheurs ont bâti une hypothèse sur le phénomène de capillarité. Lorsqu'un tube de verre fin (analogue au xylème) est placé verticalement dans de l'eau, on remarque que le niveau d'eau monte dans le tube (figure 5). Le mouvement se produit en réponse à trois forces : (1) l'adhésion, (2) la capillarité et (3) la tension superficielle. Détaillons ces trois forces :

1. La force d'adhésion est une attraction entre différentes molécules. Dans notre cas, l'eau interagit avec un substrat solide (le tube) par le biais de la liaison hydrogène. Les molécules d'eau sont tirées vers le haut lorsqu'elles se lient les unes aux autres et adhèrent à la paroi du tube.

2. La force de cohésion est une attraction entre molécules semblables. Comme les molécules d'eau sont en cohésion, la traction exercée par l'adhésion est

transmise aux autres molécules. La colonne d'eau s'élève alors contre la force de gravité.

Les effets de l'adhésion, de la cohésion et de la gravité sont responsables de la formation d'un ménisque concave. Un ménisque se forme à la plupart des interfaces air-eau, y compris dans le xylème.

3. La tension superficielle est une force qui existe entre les molécules à l'interface air-eau. Les molécules d'eau à la surface, forment des liaisons hydrogène qu'avec les molécules d'eau voisines. Ces molécules de surface, elles donc moins de voisines que celles en dessous (figure 5). De ce fait elles ont des forces d'attraction plus fortes et se lient entre elles plus étroitement.

Ces trois forces s'opposent à l'effet de la gravité, et est appelé force capillaire.

Tout comme la pression racinaire, l'action capillaire peut transporter l'eau que sur une distance limitée. On estime que cette force peut faire monter l'eau d'environ 1 mètre dans le xylème.

On détermine la hauteur d'eau par la loi de Jurin :

$$h = \frac{2A}{r\rho g}$$

Avec A la tension superficielle de l'eau.

On en conclut donc que ces deux forces ne peuvent pas expliquer comment l'eau passe des racines à la cime d'un arbre. Comment cela se produit-il alors ?

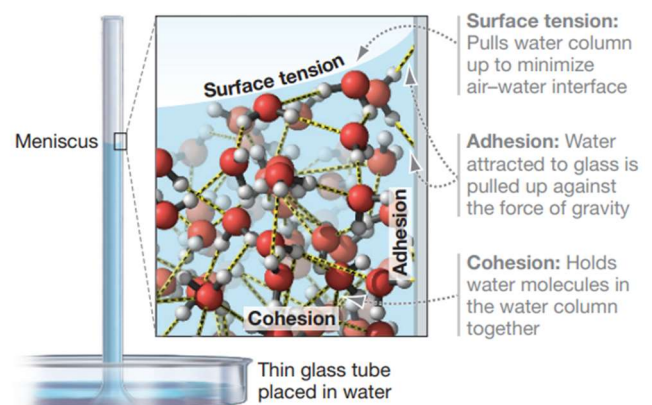


Figure 5 : L'eau monte par l'action de capillarité

La théorie de la cohésion-tension

L'hypothèse principale pour expliquer le mouvement de l'eau sur de longues distances chez les végétaux est la théorie de la cohésion-tension. Les scientifiques pensent que l'eau est tirée des racines vers les feuilles grâce à un gradient de potentiel hydrique. Ce potentiel serait dû aux forces générées par la transpiration des feuilles (voir Figure 4).

Pour comprendre le fonctionnement de la force de cohésion-tension, nous vous avons fait un schéma explicatif (figure 6). On remarque que les espaces à l'intérieur de la feuille sont remplis d'air humide suite à l'évaporation. Lorsqu'un stomate s'ouvre, l'air humide est exposé à l'atmosphère.

Cela crée un fort gradient de potentiel hydrique entre l'intérieur de la feuille et son environnement. Plus le gradient est élevé, plus la vapeur d'eau se diffuse rapidement à travers les stomates.

L'étape 2 montre qu'à mesure que la feuille perd de l'eau dans l'atmosphère, l'humidité de celle-ci diminue. En réponse, une plus grande quantité d'eau s'évapore des parois des cellules. Au niveau microscopique, on constate qu'il y a des ménisques qui se forment à l'interface air-eau. À mesure que l'eau s'évapore, la surface totale de l'interface air-eau augmente. En 1894, Henry Dixon et John Joly ont émis l'hypothèse que la formation de ménisques produisait une force capable de tirer l'eau des racines, à des dizaines ou des centaines de mètres. Est-ce vraiment possible ?

PROCESS: THE COHESION-TENSION THEORY

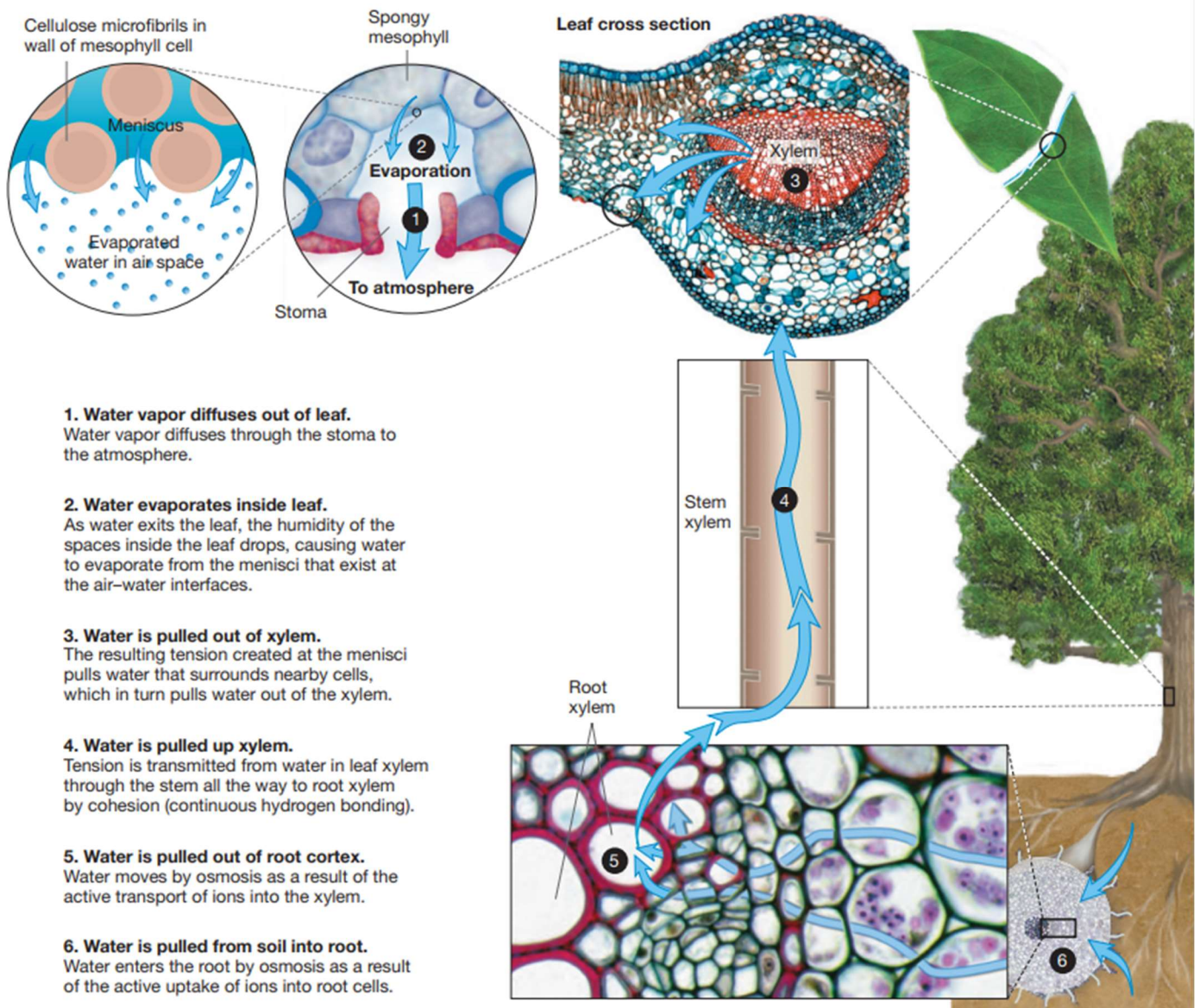


Figure 6: La transpiration crée une tension qui est transmise des feuilles aux racines

Le rôle de la cohésion-tension dans le transport de l'eau

La théorie de la cohésion-tension est que la force générée à l'interface air-eau est transmise :

- Au fluide dans le xylème (étape 4),
- Au fluide du tissu racinaire (étape 5),
- Et au fluide dans la terre (étape 6).

La transmission de la force de traction des racines aux feuilles est possible parce que le xylème forme un réseau continu. Aussi, toutes les molécules d'eau sont liées les unes aux autres par des liaisons hydrogène (cohésion).

En effet, la théorie de la cohésion-tension du mouvement de l'eau stipule que grâce à la liaison hydrogène entre les molécules d'eau, l'eau est tirée vers le haut.

Notez que la plante ne dépense pas d'énergie pour créer la force de traction. Cette force est générée par l'énergie solaire, qui entraîne l'évaporation. Le transport de l'eau est donc alimenté par l'énergie solaire.

Création d'un gradient de potentiel hydrique

On peut imaginer la théorie de la cohésion-tension en termes de potentiels d'eau. Dans le xylème, le mouvement de l'eau est entièrement déterminé par les différences de potentiel de pression. L'eau contenue dans le xylème se déplace par écoulement massif (un mouvement des molécules par un gradient de pression).

La force de traction générée au niveau des ménisques dans les feuilles abaisse le potentiel de pression de l'eau dans les feuilles. Même si la tension créée au niveau de chaque ménisque est relativement faible, il y a tellement de ménisques dans les feuilles d'une plante que la tension créée par la somme des petites forces est immense. De ce fait, le gradient de potentiel hydrique obtenu est assez grand pour vaincre la force de gravité et tirer l'eau sur de longues distances.

Pour comprendre l'ampleur des forces en jeu, imaginez les xylèmes comme des groupes de pailles. Lorsque vous utilisez une paille, le vide que vous créez en aspirant fait monter le liquide. Cette aspiration crée une différence de pression d'environ -0,1 MPa. Cette

différence de pression peut faire monter l'eau jusqu'à 10 m.

On sait qu'à un faible nombre de Reynolds, la différence de pression nécessaire pour monter l'eau dans un petit tube est inversement proportionnelle à r^4 :

$$\Delta p = \frac{8 \mu J L}{\pi r^4}$$

Avec J le flux volumique de l'eau ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), L la longueur du tube et μ la viscosité dynamique.

Par analogie, la pression négative exercée par les ménisques dans les feuilles est d'environ de -2,0 MPa.

La force obtenue est alors suffisante pour aspirer l'eau sur une centaine de mètres.

L'importance d'une seconde paroi cellulaire

Si on aspire suffisamment dans une paille et que la résistance à l'extrémité de la paille est suffisamment élevée, le gradient de pression entre l'intérieur de la paille et l'atmosphère peut vaincre la rigidité de la paille et la déchirer. Des forces similaires existent lorsque l'eau est drainée dans le xylème. On se demande alors comment le tissu vasculaire peut supporter des pressions de -2,0 MPa sans se déchirer ? La réponse se trouve dans l'épaississement des parois cellulaires des vaisseaux. Les cellules du tissu vasculaire ont des parois renforcées par des molécules de lignine. Par conséquent, le xylème est rigide et peut supporter une tension interne sans se déchirer.

L'évolution de cette seconde paroi cellulaire a participé à l'évolution des végétaux car elle a permis aux vaisseaux de résister à des pressions négatives extrêmes. Le résultat ? De grands arbres.

Conclusion

L'eau peut monter sur une courte distance dans le xylème par la pression des racines ou l'action capillaire.

Le transport de l'eau sur de longues distances dépend du gradient de potentiel hydrique. Ce gradient est créé principalement par le potentiel de pression négatif de l'eau dans les feuilles.