

I bomabeka Sandrine (TS2)

Achouri Karim (TS1)

Aras Talip (TS2)

Bouallouche Yacine (TS2)

Khiyer Nabil (TS2)

Lycée Blaise Cendrars, Sevran (93270)

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?



Olympiades de physique 2004

Remerciements

A nos professeurs Mme Tassy et M. Dubuisson qui nous ont supervisés tout au long de la préparation des Olympiades.

A nos professeurs Mme Géraud, Mme Tiphaine, Mme Launay et M. Mayeur pour nous avoir apporté leur aide complémentaire.

A notre documentaliste Mme Figoni pour nous avoir fourni les documents qui nous étaient nécessaires.

A M. Colinart, chercheur du CNRS qui a accepté de parrainer notre projet et qui nous a régulièrement accueillis et rendu visite pour nous éclairer sur les problèmes rencontrés ainsi qu'à toute l'équipe du laboratoire de Biorhéologie et d'Hydrodynamique Physico-Chimique.

Sommaire

Introduction

L'eau dans les arbres

CHAPITRE I : Le phénomène d'osmose

1. Définition	7
2. Expérience de mise en évidence	7
3. Application aux végétaux	8
4. Application à l'arbre	10
5. Conclusion	10

CHAPITRE II : Tension superficielle et capillarité

1. Introduction	11
2. Mise en évidence du phénomène	11
3. Méthode du dièdre	11
4. Méthode de l'arrachement	14
5. Mise en relation des deux méthodes	17
6. Application à l'arbre	17
7. Conclusion	18

CHAPITRE III : Transpiration foliaire

1. Définition	19
2. La cohésion des molécules d'eau	19
3. Expériences	20
4. Facteurs influençant la transpiration	21
5. Rapport avec la tension superficielle	22
6. Conclusion	23

Conclusion

Bibliographie

Glossaire

Introduction

De nombreuses expériences permettent de mettre en évidence la montée de la sève des racines jusqu'aux feuilles des arbres. Or, les végétaux ne possèdent pas d'organe pompe comme l'homme. De plus on sait, comme déjà les jardiniers florentins du XVII^{ème} siècle, qu'il n'est pas possible avec une pompe aspirante, de faire monter l'eau à une hauteur supérieure à dix mètres environ.

La question est donc de savoir par quels mécanismes l'eau et les substances minérales (i.e. la sève) puisées dans le sol atteignent le sommet des arbres mesurant parfois plus de cent mètres.

Celle-ci a longtemps intrigué les scientifiques. Ainsi, durant le milieu et la fin du XIX^{ème} siècle cette question a été l'une des plus débattues de la physiologie végétale. Ce n'est en fait que depuis une dizaine d'années que la communauté scientifique a une idée assez précise des mécanismes impliqués dans l'ascension de la sève, même si la question n'est pas entièrement résolue. Ces mécanismes que l'on peut croire au premier abord seulement biologiques, sont en réalité régis par des lois physiques. Le modèle actuel admet que l'eau entre par osmose dans les racines, monte par capillarité dans les vaisseaux conducteurs du tronc et la transpiration crée un phénomène de succion qui fait monter la sève jusqu'aux feuilles.

Nous étudierons donc ces trois phénomènes d'un point de vue physique dans un premier temps puis nous verrons pour chacun d'entre eux son implication dans l'ascension de la sève.

L'eau dans les arbres

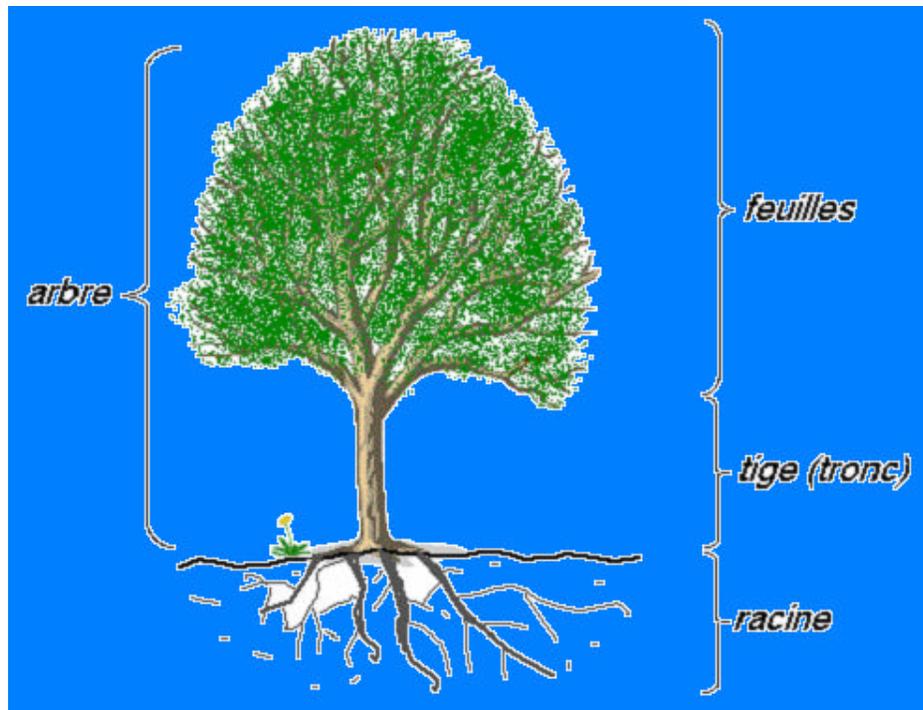
Afin d'étudier les phénomènes physiques qui permettent d'expliquer l'ascension de la sève dans un arbre, on s'intéresse dans un premier lieu à l'aspect biologique de ce sujet.

Qu'est ce qu'un arbre ? L'arbre est un végétal présentant différentes parties :

? La racine : c'est ici qu'aura lieu le phénomène d'osmose qui permet l'entrée de l'eau dans la plante.

? Le tronc : c'est ici qu'aura lieu le phénomène de capillarité qui permet la montée de la sève à une certaine hauteur, ce phénomène de capillarité étant lié à la tension superficielle.

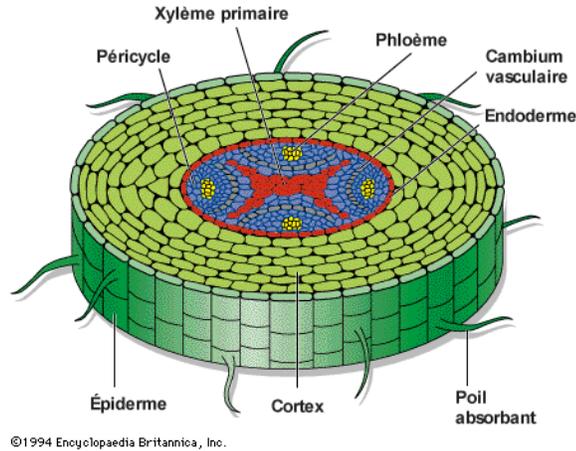
? Les feuilles : c'est ici qu'aura lieu le phénomène de transpiration qui est le phénomène majeur de l'ascension de la sève.



La racine :

La racine est constituée de différentes cellules qui forment différentes zones :

- ? Les poils absorbants
- ? La zone corticale
- ? L'endoderme



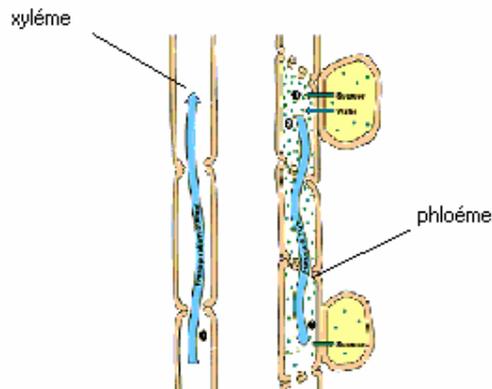
L'eau entre par osmose dans les poils absorbants et transite dans la zone corticale puis dans l'endoderme afin d'être transportée jusqu'aux vaisseaux du xylème.

Le Tronc :

Il existe deux types de vaisseaux conducteurs qui conduisent deux sèves différentes :

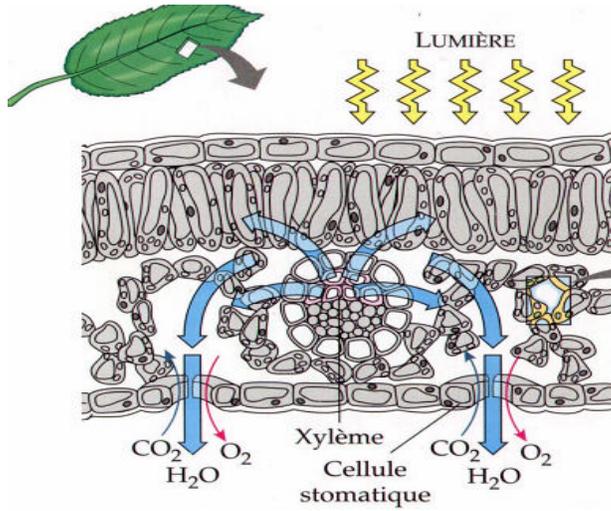
? Le xylème : c'est le vaisseau conducteur de la sève brute qui est essentiellement constituée d'eau et de sels minéraux. Cette sève est dite ascendante.

? Le phloème : c'est le vaisseau conducteur de la sève élaborée qui est essentiellement constituée des produits de la photosynthèse. Cette sève est dite descendante.



Les feuilles :

C'est au niveau des feuilles qu'aura lieu la photosynthèse. Les échanges gazeux entre les feuilles et l'environnement se font par des ouvertures microscopiques : ce sont les stomates.



Chapitre I :

Le phénomène d'osmose

1) Définition

L'osmose est le phénomène de diffusion qui se produit sous la seule influence de l'agitation moléculaire lorsque deux solutions de concentrations différentes se trouvent séparées par une membrane semi-perméable laissant passer le solvant mais non la substance dissoute.

Le solvant traverse la membrane du milieu hypotonique (qui contient le moins de substances dissoutes) vers le milieu hypertonique (contenant le plus de substances dissoutes).

Cette différence de concentration engendre une différence de pression appelée pression osmotique, dont la valeur peut être calculée pour les solutions diluées par la loi de Van't Hoff :

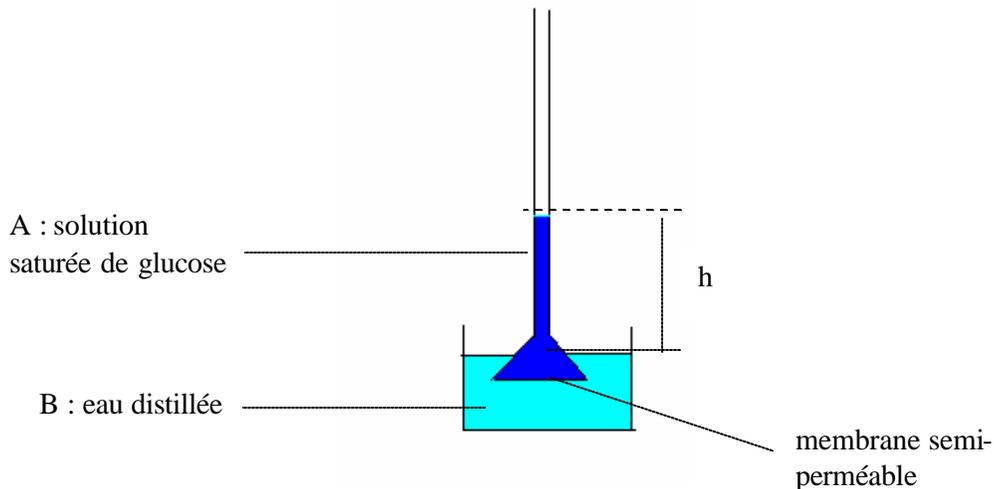
$$P = R T C$$

avec P : pression osmotique en Pascals
 R : constante des gaz parfaits
 T : température en Kelvins
 C : concentration molaire en substances dissoutes en mol.m^{-3}

La diffusion se fait alors de manière à ce que les deux concentrations tendent à s'égaliser. L'équilibre est atteint lorsque les deux solutions sont devenues isotoniques.

2) Expérience de mise en évidence

Mode opératoire :



On remplit un osmomètre d'une solution saturée de glucose. On fixe l'osmomètre afin que la membrane semi-perméable trempe dans un bécber rempli d'eau distillée. Au début de l'expérience le niveau dans le bécber et dans l'osmomètre est le même.

Observation :

Le niveau monte dans l'osmomètre. De l'eau passe donc du compartiment B contenant l'eau distillée, au compartiment A contenant la solution de glucose.

Interprétation :

Comme les molécules d'un gaz, les molécules d'une solution présentent des mouvements incessants qui se font dans tous les sens et au hasard (et dont l'intensité est liée à la température) et à la pression du milieu. Lorsque les molécules d'eau viennent frapper la membrane, elles traversent celle-ci. Il existe donc un flux de molécules d'eau du compartiment B vers A, mais aussi du compartiment A vers B. Ces flux d'eau sont déterminés par la différence de pression osmotique π entre les deux solutions et la pression hydrostatique au niveau de la membrane. Ces flux s'égalisent lorsque la différence de pression osmotique est égale à la pression hydrostatique.

La pression osmotique est due à la différence de concentration d'où :

$$\pi = \pi_A - \pi_B = \rho C \cdot R \cdot T$$

La pression hydrostatique au niveau de la membrane est donnée par :

$$P = \rho \cdot h \cdot g$$

A l'équilibre du système : $\pi = P$ d'où :

$\pi = \rho C \cdot R \cdot T = \rho \cdot h \cdot g$ et donc :

$$h = \frac{\pi}{\rho \cdot g} = \frac{\rho C \cdot R \cdot T}{\rho \cdot g}$$

avec : π la différence de pression osmotique en Pascals

R la constante des gaz parfait en $J \cdot mol^{-1} K^{-1}$

T la température en Kelvin

ρ la masse volumique en $kg \cdot m^{-3}$

g l'accélération de la pesanteur $N \cdot kg^{-1}$

h la hauteur d'eau en m

ρC différence de concentration entre les deux compartiments en $mol \cdot m^{-3}$

P le poids en Newton

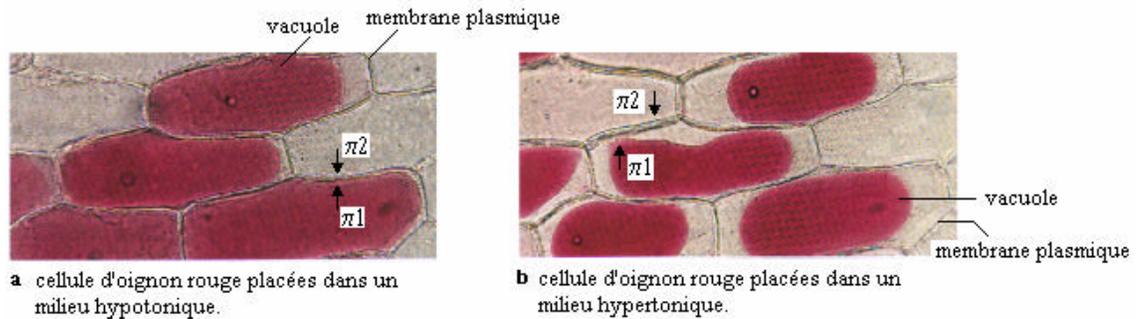
3) Application aux végétaux : Comment l'eau pénètre-t-elle dans les cellules ?

Expérience et observation :

Sur une écaille de bulbe d'oignon rouge, on prélève un lambeau d'épiderme que l'on place dans un liquide de montage approprié, et que l'on observe au microscope.

La photographie a présente des cellules adultes montées dans un milieu hypotonique, c'est-à-dire moins concentré en substances dissoutes que le suc vacuolaire. La pression osmotique π_1 du suc vacuolaire est donc plus importante que la pression osmotique π_2 du milieu extérieur, et l'eau entre dans la vacuole, La cellule est déplasmolysée.

La photographie b montre ces mêmes cellules plongées dans un liquide de montage hypertonique, c'est-à-dire plus concentré en substances dissoutes que le suc vacuolaire. La pression osmotique π_1 du suc vacuolaire est donc plus petite que la pression osmotique π_2 du milieu extérieur, les vacuoles subissent alors une perte d'eau importante. La cellule est plasmolysée.



Conclusion :

Les échanges d'eau entre les cellules et le milieu extérieur sont régis par le phénomène d'osmose.

4 a) Application à l'arbre : Comment l'eau pénètre-t-elle dans l'arbre ?

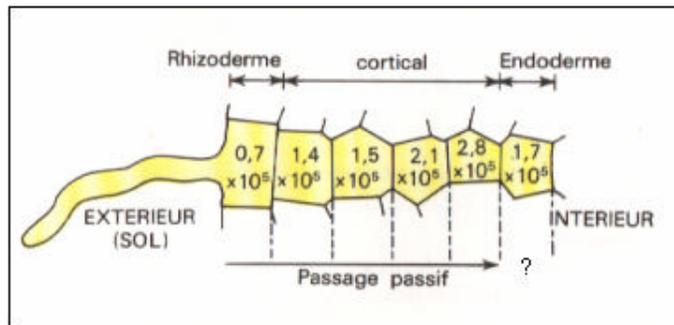
- Du milieu extérieur au poil absorbant :

Les racines portent dans la zone voisine de leur extrémité de très nombreux poils constituant la zone pilifère. Un poil absorbant est une cellule allongée qui peut atteindre 1mm de long sur 0,01mm de diamètre avec une très grande cavité interne : la vacuole. Le contenu de la vacuole ou suc vacuolaire est constitué d'eau et de substances dissoutes. Le poil absorbant est en contact, par sa face externe, avec l'eau du sol qui contient également des substances dissoutes. Or, la concentration du suc vacuolaire est supérieure à celle du milieu extérieur. L'eau pénètre donc par osmose dans les poils absorbants.

- Des poils absorbants au xylème :

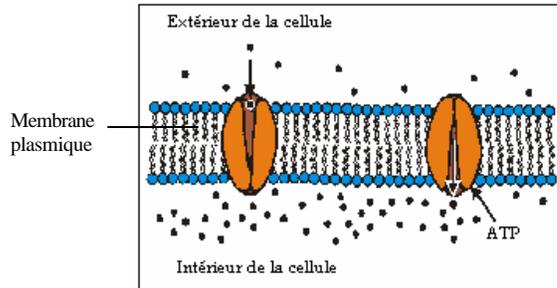
Sous la couche de cellules correspondant aux poils absorbants on trouve des cellules non différenciées, assez grandes, formant une écorce : la zone corticale. La couche la plus interne de cette zone corticale est formée d'une rangée de cellules plus petites et régulières formant l'endoderme. A l'intérieur de l'endoderme se trouve le cylindre central dans lequel on peut voir des faisceaux conducteurs : xylème et phloème.

Des mesures de la pression osmotique dans le poil absorbant et dans les cellules de la racine, montrent qu'elle s'accroît progressivement au fur et à mesure que l'on pénètre à l'intérieur de la racine. Ceci permet de comprendre le passage d'eau depuis le poil absorbant jusqu'à l'endoderme par osmose. C'est un phénomène passif.



pression osmotique dans les cellules d'une racine

Or, au niveau de l'endoderme, la pression osmotique plus faible, due à la montée de la sève dans le xylème, ne permet pas de continuer selon le même principe. La plante doit donc opérer un pompage actif de l'extérieur vers l'intérieur de l'endoderme grâce à de l'énergie fournie par la respiration cellulaire : l'ATP. C'est un phénomène actif.



4 b) Application à l'arbre : Comment la pression osmotique peut permettre à l'eau de monter dans les arbres ?

Il existe donc une différence de pression osmotique entre le milieu extérieur (le sol) et la sève contenue dans le xylème. Cette différence de pression engendre une montée du niveau d'eau dans le xylème.

Calculons cette hauteur d'eau à l'aide de la relation énoncé précédemment.

Pour cela, considérons une différence de concentration de $0,08 \text{ mol.L}^{-1}$ (valeur admise dans la littérature).

$$h = \frac{\Delta \pi}{\rho \cdot g} = \frac{C \cdot R \cdot T}{\rho \cdot g}$$

$\Delta \pi$: différence de pression osmotique en Pascals

R : la constante des gaz parfait en $\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T : la température en Kelvin

ρ la masse volumique en kg.m^{-3}

g l'accélération de la pesanteur N.kg^{-1}

h la hauteur d'eau en m

C différence de concentration entre le milieu extérieur et la sève brute en mol.m^{-3}

$$h = \frac{0,08 \cdot 10^3 \cdot 8,31 \cdot 293}{10^3 \cdot 9,81} = 20 \text{ m}$$

5) Conclusion

La pression osmotique permet donc une élévation du niveau d'eau de 20 m. Ainsi ce phénomène n'explique pas entièrement l'ascension de la sève dans les arbres puisque certains arbres mesurent plus de 100 m. Il existe donc d'autres phénomènes impliqués dans la montée de la sève.

Chapitre II :

Tension Superficielle – Capillarité

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

1) Définition

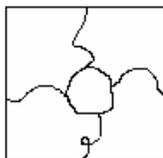
La sève brute monte dans l'arbre à travers le xylème (ensemble de capillaires fins) par capillarité. Pour vérifier cela, plongeons un fin capillaire dans une solution colorée. Nous observons une montée de cette solution du fait de la tension superficielle.

La tension superficielle est définie comme étant une force par unité de longueur agissant à la surface libre d'un liquide. Elle tend à diminuer cette surface.

2) Mise en évidence de ce phénomène

Expérience :

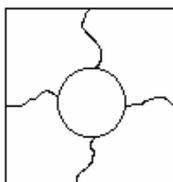
On prend un fil formant un anneau non tendu dans un cadre rigide :



On plonge le cadre dans une solution de détergent (liquide vaisselle) pour obtenir un film mince. On perce le film mince de liquide au centre de l'anneau.

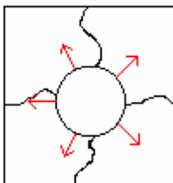
Observation :

Le fil formant l'anneau se tend spontanément, réduisant ainsi la surface du film mince restant entre l'anneau et le cadre.



Interprétation :

Une force est exercée sur l'anneau puisque celui-ci forme un cercle parfait. Cette force est située dans le plan de la surface de la couche mince du liquide, dirigée vers le liquide et normale à l'anneau.



3) La méthode du dièdre

Principe

Le dièdre est un dispositif formé de deux plaques de verres écartées à l'une de leurs extrémités par une cale. Comme dans un tube de petit diamètre, l'eau monte entre les plaques formant le dièdre par capillarité.

La méthode du dièdre permet de déterminer de façon expérimentale la valeur du produit $\gamma \cos \theta$ présent dans la relation de Jurin :

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

$$H = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r}$$

H : hauteur atteinte par capillarité, en m
 θ : angle de raccord liquide/paroi, en degrés
 γ : coefficient de tension superficielle, en N.m^{-1}
 ρ : masse volumique du liquide, en kg.m^{-3}
 g : intensité du champ de pesanteur, en N.kg^{-1}
 r : diamètre du capillaire, en m

Expérience

On dispose de deux plaques de verre reliées entre elles par des pinces, formant un dièdre. On place les deux plaques de verre dans un cristalliseur rempli d'eau. A l'une des extrémités du dièdre, on place une cale d'épaisseur e entre les plaques.

Précautions : on doit impérativement nettoyer les plaques de verre ainsi que le cristalliseur à l'eau puis à l'alcool à brûler pour obtenir de bons résultats.

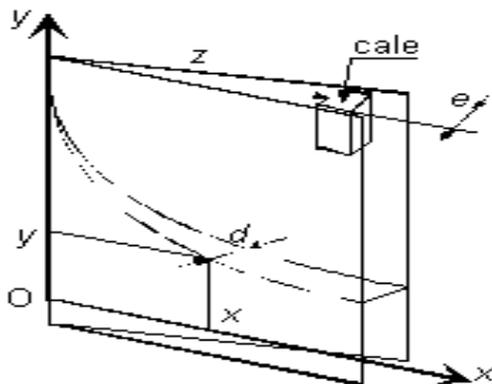
Observations

L'expérience réalisée, on observe que l'on a une ascension d'eau importante là où l'écart entre les plaques est petit. Au contraire, le liquide monte peu là où l'écart entre les plaques est plus grand. On note que la surface libre de l'eau forme une hyperbole.



Interprétation de l'expérience

Déterminons l'équation de la courbe formée par la surface de l'eau.



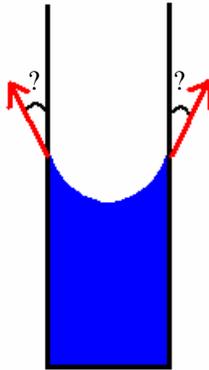
On considère un point de la surface libre du liquide :

d représente l'écart entre les plaques en ce point.
 x et y représentent l'abscisse et l'ordonnée de ce point dans le repère indiqué sur le schéma ci-contre.

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

Le liquide est ici à l'équilibre. Les forces qui lui sont appliquées se compensent donc : $P = F$ soit $P = F$ où P représente le poids du liquide et F la réaction à la tension superficielle.

Comme on a ici affaire à deux plaques, F se décompose en deux forces de même valeur f représentées en rouge sur le schéma suivant :



Vue latérale du dièdre

D'après le schéma précédent, on peut déduire que la résultante F est verticale et vers le haut, de valeur $F = 2f \cos \alpha$. On note aussi l'importance du facteur $\cos \alpha$ dont dépend la valeur de la résultante F .

On considère une portion du liquide située entre les droites verticales d'abscisses x et $x + dx$. La longueur de la surface libre de cette portion de liquide en contact avec chaque plaque vaut dx . La résultante verticale des réactions aux forces de tension superficielle vaut donc

$$F = 2 f \cos \alpha dx.$$

Soit P le poids de la portion de liquide considérée.

On a $P = m g$ soit $P = \rho V g$ avec $V = y dx d$

L'égalité $P = F$ conduit donc à $2 f \cos \alpha dx = \rho y dx d g$

$$\text{D'où } y = \frac{2 f \cos \alpha}{\rho d g}$$

Cette équation correspond à la relation de Jurin, car l'expérience du dièdre est en fait l'équivalent de l'ascension d'un liquide dans un capillaire.

Par ailleurs l'écart d entre les plaques dépend de l'abscisse x du point considéré.

En effet, on a : $d = \frac{ex}{\square}$ où e désigne l'épaisseur de la cale et \square la largeur des plaques (en $x = \square$, on a $d = e$)

$$\text{On a donc entre } x \text{ et } y \text{ la relation suivante : } y = \frac{2 f \square \cos \alpha}{\rho g e x}$$

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

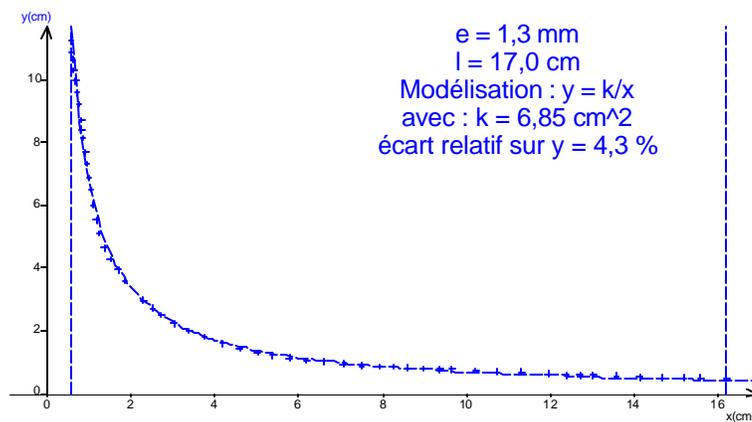
Cette relation est de la forme $y = k/x$ avec $k = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g e}$ = constante donc c'est l'équation d'une hyperbole.

Exploitation de l'expérience et calcul du facteur $\gamma \cos\theta$

On photographie l'expérience et on repère différents points de la surface libre du liquide avec le logiciel Regavi (de la société Pierron).

Les coordonnées des points sont basculés dans le logiciel Regressi (de la société Pierron). On modélise alors la courbe joignant les points expérimentaux par une hyperbole d'équation : $y = \frac{k}{x}$

Résultats de la modélisation sur Regressi :



Nous obtenons la valeur $k = 6,85 \text{ cm}^2 = 6,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

D'où $\frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g e} = 0,000685$

Donc $\gamma \cos\theta = 0,026 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

Avec : $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$g = 9,81 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$

$l = 17,0 \text{ cm} = 17,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

$e = 1,3 \text{ mm} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Conclusion :

La méthode du dièdre nous a permis de déterminer la valeur expérimentale du facteur $\gamma \cos\theta$ mais aussi de vérifier la relation de Jurin. Elle met en évidence l'importance de la tension superficielle γ dans la montée d'un liquide par capillarité ainsi que celle de l'angle de raccord à l'interface liquide/paroi. Toutefois, elle ne permet pas de connaître la valeur de θ seul, et donc ne permet pas de prévoir l'importance de la contribution du phénomène de capillarité dans l'ascension de la sève.

4) La méthode de l'arrachement

Principe

Comme nous l'avons montré précédemment, il existe une force exercée par le liquide répartie sur la surface de l'objet en contact avec le liquide. L'expression de cette force fait

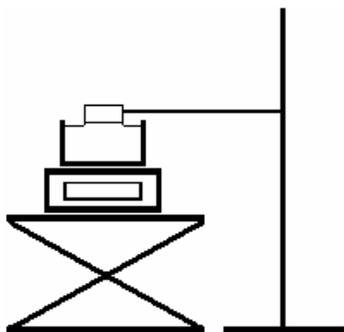
Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

Intervient un coefficient de proportionnalité entre la longueur du contact entre la surface libre du liquide et l'objet, et la valeur de la force exercée. Ce coefficient est appelé coefficient de tension superficielle, exprimé en N.m^{-1} .

Le but de cette expérience consiste à déterminer le coefficient de la tension superficielle d'un liquide.

Expérience

Nous disposons d'une balance électronique, d'une plaque de verre (lame de microscope), d'un élévateur, et d'un récipient en verre à bord bas. Avant la manipulation, lavons le récipient et la lame de verre avec de l'alcool à 90° pour rendre la surface de la plaque la plus propre possible. Tout d'abord versons de l'eau distillée dans le récipient et plaçons ce récipient sur la balance électronique qui est déjà sur l'élévateur. Maintenons la plaque (lame de verre) avec un pied et une pince de façon à ce qu'elle soit juste au-dessus du récipient. Enfin, faisons la tare du récipient d'eau distillée sans que la plaque soit immergée. Introduisons la plaque d'un centimètre dans le récipient puis remontons-la petit à petit de façon à ce que la plaque placée horizontalement soit à la limite du liquide (à l'arrachement) en s'aidant de l'élévateur.



Observation :

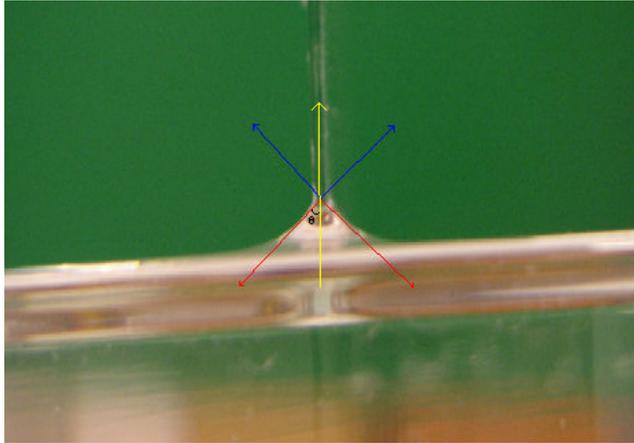
Plus nous remontons la plaque et plus la valeur de la masse affichée est petite (elle est donc négative puisque la tare a été faite avant immersion de la lame). La valeur est minimale juste avant l'arrachement entre la plaque et le liquide. La balance affiche 0 lorsque le contact entre la lame et le liquide est rompu, puisque nous revenons alors dans les conditions initiales.

Interprétation :

Nous savons que la force de tension superficielle (en rouge sur le schéma suivant) est dirigée de la lame vers le liquide. Sa réaction est donc une force opposée dirigée du liquide vers la lame (en bleu sur le schéma). Cette force est dirigée suivant la surface libre du liquide. Elle s'exerce sur les deux faces de la lame, d'où une résultante verticale dirigée vers le haut. C'est cette force résultante qui s'oppose au poids de l'ensemble {cristalliseur + eau}. Elle est représentée en jaune sur le schéma suivant.

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

Supprimé : ¶



Plus la lame est sortie de l'eau et plus l'angle θ est petit, donc plus la résultante est grande et donc plus le poids apparent (ou la masse apparente) de l'ensemble pesé est faible. Juste avant l'arrachement, on peut considérer que θ est nul.

A ce moment, la masse affichée est minimale : $m = - 0,00114 \text{ kg}$

Exploitation de l'expérience et calcul du coefficient de tension superficielle ?

Dans un premier temps, cherchons la valeur de la force résultante F_R :

$$F_R = (m' - m) \cdot g$$

avec m masse apparente de l'ensemble avant l'arrachement, en kg

m' masse apparente de l'ensemble avant immersion de la lame, en kg

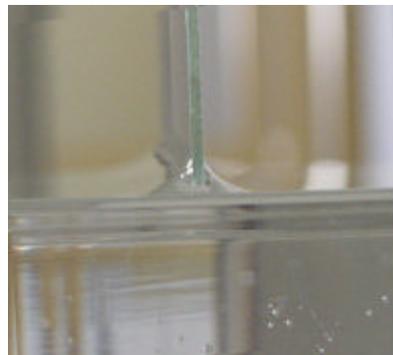
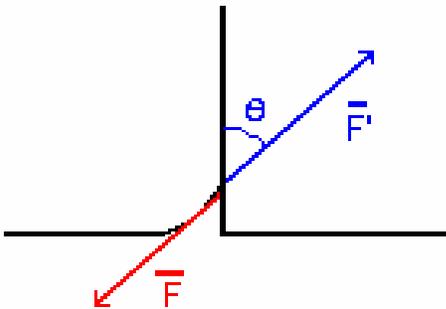
g intensité du champ de pesanteur en $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$

$$F_R = (0 + 0,00114) \cdot 9,81$$

$$F_R = 11,2 \text{ mN}$$

La force F_R vaut 11,2 mN

Calculons ensuite le coefficient de tension superficielle ????



Nous avons vu précédemment dans la mise en évidence que la force F' est proportionnelle à la longueur de l'interface entre la surface libre du liquide et la plaque

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

plongée dans le liquide, et au coefficient de la tension superficielle γ . Cette force forme un angle θ avec la direction verticale (cf. schéma précédent). La résultante de la force s'obtient donc par la relation ci-dessous :

$$F_R = 2 \gamma \cdot l \cdot \cos \theta \text{ si la longueur de l'interface vaut } 2l$$

A l'arrachement, l'angle θ vaut 0° donc $\cos \theta = 1$

- ? $F_R / (2l)$ avec l en mètres et F_R en $N \cdot m^{-1}$
- ? $0,0735 / (2 \cdot 0,02) = 1,8375$
- ? $1,8375$ $N \cdot m^{-1}$

Conclusion

Le coefficient de tension superficielle dans ce cas (le liquide étant de l'eau distillée) vaut $0,0735 N \cdot m^{-1}$.

Nous savons que la valeur théorique est de $0,0720 N \cdot m^{-1}$ à $20^\circ C$.

Calculons l'écart relatif :

$$\text{écart relatif} = (0,0735 - 0,0720) / 0,0720 = 0,02 \text{ soit } 2 \%$$

Cet écart relatif peu important est dû aux erreurs expérimentales, aux impuretés sur la plaque et dans l'eau et aux facteurs externes (température, pression atmosphérique...).

Remarque : D'autres méthodes permettraient d'obtenir le coefficient de tension superficielle, comme la méthode du capillaire ou celle de l'écoulement.

5) Mise en relation de deux méthodes

Le but de cette mise en relation est de déterminer l'angle θ (angle de raccordement entre le liquide et la plaque) dans le cas de la méthode du dièdre.

En effet le résultat final trouvé grâce à la méthode du dièdre est :

$$\gamma \cdot \cos \theta = 0,026 N \cdot m^{-1}$$

Or nous avons trouvé avec la méthode de l'arrachement une valeur du coefficient de tension superficielle $\gamma = 0,0735 N \cdot m^{-1}$

$$\begin{aligned} \text{d'où :} \quad & \cos \theta = 0,026 / 0,0735 \\ & \cos \theta = 0,35 \\ \text{donc} \quad & \theta = 69^\circ \end{aligned}$$

L'angle de raccord θ vaut environ 69° .

6) Application à l'arbre

Nous avons vu précédemment, dans la méthode du dièdre, qu'avec la loi de Jurin, nous pouvons calculer à quelle hauteur un liquide peut monter dans un capillaire fin.

$$H = \frac{2 \gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

Comment la sève monte-t-elle dans les arbres ?

Avec :

γ : coefficient de tension superficielle en N.m^{-1}

θ : angle de contact entre le liquide et la paroi

r : rayon intérieur du capillaire en m

ρ : masse volumique de la solution en kg.m^{-3}

g : intensité de la pesanteur en N.kg^{-1}

Cherchons à quelle hauteur peut monter la sève dans un vaisseau du xylème par capillarité.

Nous savons que le rayon d'un vaisseau du xylème est de l'ordre de 10^{-5} m, que la masse volumique de la sève brute (ascendante) est d'environ de 10^3 kg.m^{-3} , que l'intensité de pesanteur est de l'ordre de 10 N.kg^{-1} et que γ (calculé précédemment par la méthode de l'arrachement) vaut $0,0735 \text{ N.m}^{-1}$ soit environ $0,1 \text{ N.m}^{-1}$.

L'angle de raccord θ dans le cas de l'interface sève/xylème n'est pas connu mais $\cos \theta$ peut être majoré par 1 pour un calcul d'ordre de grandeur.

Application numérique :

$$H \approx \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \approx \frac{2 \cdot 0,1}{10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-5}} \approx 2 \text{ m}$$

7) Conclusion

Par capillarité, la sève brute peut atteindre une hauteur proche de 2 mètres dans un vaisseau du xylème. Or nous savons tous qu'il existe des arbres pouvant atteindre des hauteurs dépassant les cent mètres. Nous pouvons en déduire que le phénomène de capillarité n'est pas seul responsable de la montée de la sève brute dans les arbres.

Chapitre III :

La transpiration foliaire

1) Définition

La transpiration foliaire est définie comme étant l'émission d'eau à l'état de vapeur par les feuilles des végétaux dans l'atmosphère. La transpiration est le mécanisme essentiel qui permet le maintien de l'équilibre hydrique des végétaux, et la régulation de la température de l'arbre. Seul 10 % environ de l'eau puisée dans le sol sert à la photosynthèse, le reste est évaporé lors de la transpiration foliaire. Nous allons voir comment ce phénomène permet à l'eau de monter jusqu'au feuilles des arbres.

2) La cohésion des molécules d'eau

La molécule d'eau se compose de deux atomes d'hydrogène liés à un atome d'oxygène de manière covalente. Cette liaison est dite polarisée car l'oxygène est un élément plus électronégatif que l'hydrogène (il a tendance à attirer les électrons de son côté), ce qui a pour conséquence que des pôles apparaissent dans la molécule d'eau. On a donc un pôle négatif situé au niveau des paires d'électrons libres de l'oxygène et deux pôles positifs au niveau des atomes d'hydrogène. Cette polarisation de l'eau a pour conséquence une attraction entre pôles opposés, qui crée une interaction stabilisante appelée liaison hydrogène.

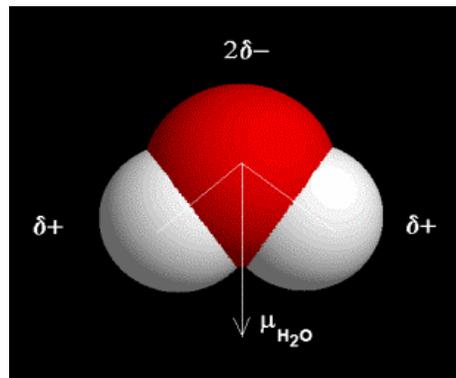


Schéma de la polarisation de la molécule d'eau

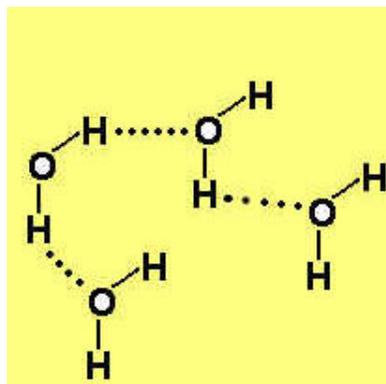


Schéma représentatif des liaisons hydrogènes entre ces molécules

Cette interaction entre les molécules d'eau induit la cohésion entre chacune d'elles. Ce phénomène permet alors la montée du liquide lors de la transpiration : l'eau circulant dans les vaisseaux constitue une colonne continue depuis les racines jusqu'au sommet de la plante et ainsi permet la montée de celle-ci lorsque cette colonne est "tirée".

Il arrive parfois qu'une perte de cohésion entre les molécules soit à l'origine d'une cavitation (formation de bulles de gaz) qui empêche la montée de l'eau : c'est l'embolie.

Cependant, nous pouvons nous interroger sur la force qui permet la montée de cette colonne.

3) Expériences

a) Objectifs

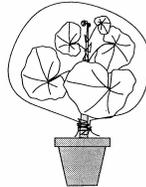
On réalise deux expériences dans le but de mettre en évidence la transpiration foliaire et d'en dégager les caractéristiques.

b) Expérience du sachet

Protocole :

- Préparer un pot de plante en recouvrant la terre autour du pied par du plastique bien hermétique, de manière à éviter une évaporation au niveau du sol.
- Entourer le feuillage avec un sac en plastique hermétique.
- Attendre 1 à 2 heures et observer le sac plastique.

Schéma de l'expérience :



Observation et interprétation :

On observe de fines gouttelettes d'eau visibles à l'intérieur du sac : de l'eau s'est évaporée de la plante par transpiration.

c) Expérience du cône (similaire à l'expérience de Dixon)

Matériel :

- Cône poreux en terre cuite : les pores jouent le rôle des stomates des feuilles.
- Sèche-cheveux classique qui agit sur deux paramètres : la température et la convection.
- Tige de verre creuse avec un diamètre intérieur proche de 3 mm représentant le xylème.
- Huile (de cuisine) et eau distillée.

Protocole :

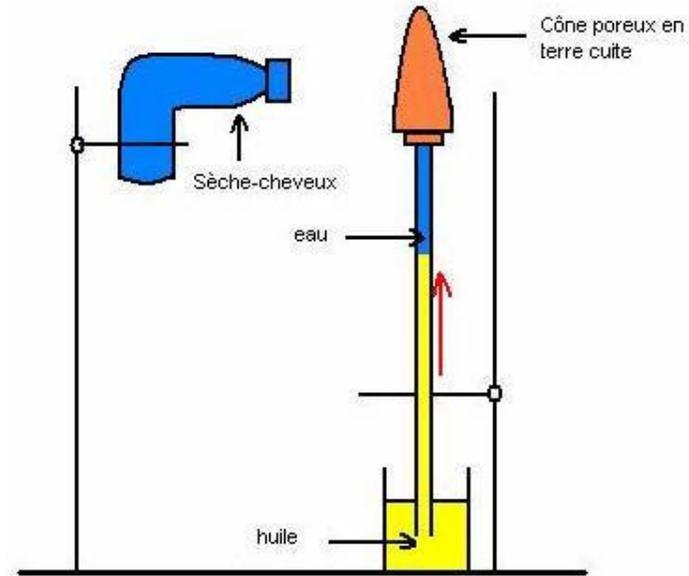
- Laisser tremper entièrement le cône poreux dans un bécher rempli d'eau distillée afin d'évacuer tout l'air.
- Préparer un bécher contenant de l'huile.
- Assembler la tige au cône à l'aide de divers joints bien hermétiques.
- Remplir le tout d'eau par le bas, faire évacuer toutes les bulles d'air encore présentes, boucher la tige avec le doigt puis la placer dans le bécher rempli d'huile et fixer le tout à un support.

- Créer une convection d'air proche du cône à l'aide du sèche-cheveux fixé à un support.

Remarques :

- Cette expérience n'est probante que si la colonne d'eau est ininterrompue.
- L'expérience est réalisée ici avec de l'huile afin d'observer une interface très visible entre les deux liquides.

Schéma :



Observations et conclusions :

On peut remarquer que lorsque le sèche-cheveux est en marche, le liquide s'évapore : cela est visible car l'interface eau/huile monte du fait que l'eau s'évapore par le cône. Plus la température monte, plus il y a évaporation de l'eau. De même plus l'agitation de l'air est importante, plus l'eau s'évapore. Ainsi cette expérience qui reproduit bien le phénomène de transpiration dans l'arbre nous montre que l'évaporation permet en partie l'ascension du liquide jusqu'aux feuilles (cône ici) et que le débit de transpiration est influencé par la température et la convection.

4) Les facteurs influençant la transpiration

Au niveau de la plante, la transpiration dépend de la surface d'évaporation et donc du nombre de feuilles, de leur constitution, de la densité des stomates, mais aussi elle dépend du climat, de l'humidité du sol et de l'air, de la température, de l'agitation de l'air, de la lumière...

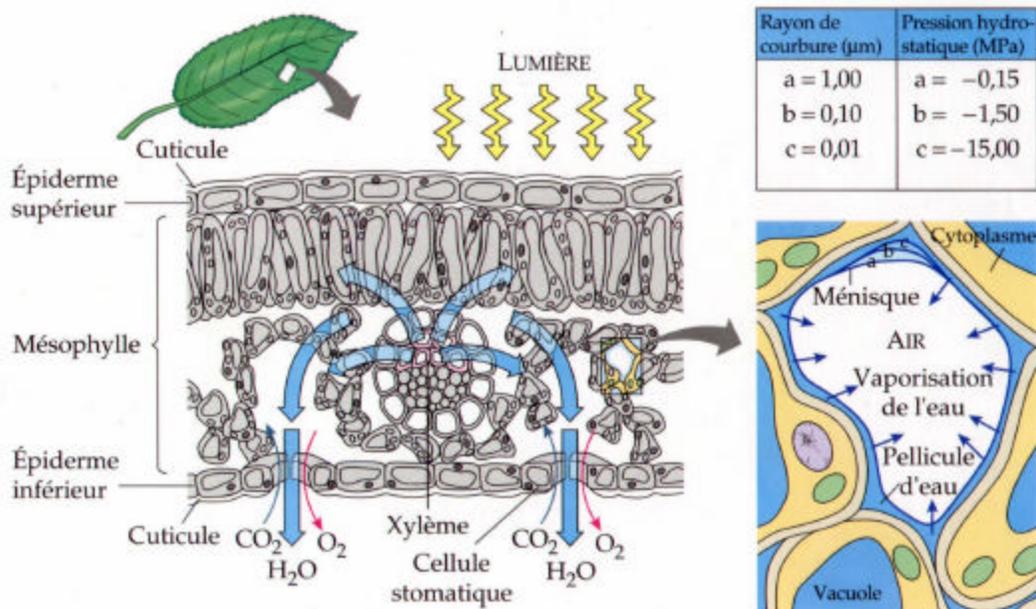
L'agitation de l'air favorise la transpiration : l'air au contact des tissus est renouvelé ce qui permet l'évacuation de la vapeur à peine sortie, empêchant ainsi le stockage de la vapeur d'eau autour de la feuille.

5) Interprétation : rapport avec la tension superficielle

La feuille, du point de vue de la transpiration, se comporte comme un corps poreux, c'est à dire que les stomates des feuilles se comportent comme des pores. La surface libre de l'eau dans les pores forment des ménisques et une force liée à la tension superficielle s'exerce sur l'eau.

Cette force est dirigée vers l'extérieur des pores, et elle est d'autant plus intense que les pores sont fins et le ménisque creusé (cf. partie 2).

Lors de l'évaporation de l'eau, le film d'eau se rétracte et les ménisques se creusent (positions a, b et c sur le schéma ci-dessous à droite), la force s'intensifie et la colonne est alors tirée.



Cette force, très intense, permet d'expliquer le maintien de la colonne d'eau à des hauteurs importantes.

Application numérique :

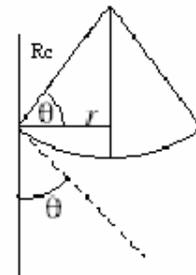
Dans la partie sur la capillarité, nous avons écrit la loi de Jurin sous la forme :

$$H = \frac{2\gamma \cos\theta}{\rho g r}$$

Où $r = R_c \cos\theta$ avec R_c rayon de courbure du ménisque.

Donc, on peut aussi écrire la loi de Jurin sous la forme :

$$H = \frac{2\gamma}{\rho g R_c \cos\theta}$$



[...] des forces de tensions superficielle attirent toute la colonne liquide, comme dans un capillaire. La hauteur de la colonne d'eau ainsi soutenue est inversement proportionnelle au rayon du ménisque : pour soutenir une colonne d'eau de 120 mètres, le rayon du ménisque d'évaporation doit être inférieur ou égal à 0,12 micromètres (millième de millimètres). En fait, les ménisques qui se forment sur le réseau de fibrilles cellulosiques des parois auraient un rayon de courbure de 2 à 4 millièmes de micromètre seulement, si bien que la colonne d'eau pourrait monter encore plus haut.

Source : Dossier hors série Pour la science de janvier 2000, article : « Les sèves et leur circulation » de S.Delrot.

Effectivement, en appliquant la loi du Jurin en prenant un rayon de courbure de $0,12 \mu\text{m}$, et un coefficient de tension superficielle de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-1} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. On obtient une hauteur de la colonne d'eau de :

$$H = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-1}}{10^3 \cdot 10 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6}} \cdot 120 \text{ m}$$

6) Conclusion

Comme dans la plupart des phénomènes naturels, beaucoup de facteurs influent sur la transpiration foliaire, et plus précisément sur le débit de transpiration. Cette transpiration est à l'origine des mouvements hydrauliques dans la plante : en transpirant, la plante libère de l'eau ; par conséquent elle absorbe l'eau du sol pour compenser cette perte. Parallèlement, les propriétés de l'eau permettent ce flux. En effet il existe une cohésion importante entre les molécules d'eau, ce qui permet à la colonne d'eau de ne pas se rompre. Lorsqu'il y a transpiration, les molécules d'eau, s'évaporant, sont remplacées par celles du dessous, et ainsi la colonne d'eau monte. Les forces exercées sur celle-ci permettent une ascension à des hauteurs vertigineuses.

Conclusion

A l'issu de ce projet, nous sommes parvenus à une certaine maîtrise des phénomènes physiques impliqués dans l'ascension de la sève. En effet, trois phénomènes sont à l'origine de l'ascension de la sève : ce sont l'osmose, la capillarité et la transpiration.

Lors de la progression de notre projet, nous avons perfectionné nos montages ainsi que l'exploitation des documents et des mesures qui nous ont permis de parvenir progressivement à des résultats plus proches des valeurs théoriques et surtout de réduire leur dispersion.

Grâce aux conseils du jury interacadémique, nous avons pu améliorer notre dossier et les manipulations qui leur ont été présenté. Nous avons obtenu une pleine satisfaction pour l'expérience réunissant les trois phénomènes physiques expliquant la montée de la sève dans l'arbre.

Ce projet nous a permis d'adopter une démarche scientifique : conception du projet, réalisation des expériences et exploitation des mesures, tout en allant plus loin que le cadre des TP en classe. Nous avons utilisé du matériel plus perfectionné, rencontré de nouvelles notions et réinvesti nos connaissances. D'un point de vu plus personnel, ce projet nous a appris l'entraide et la collaboration dans le travail de groupe, une aptitude à observer, manipuler, raisonner, à rendre compte de nos observations, ainsi qu'une plus grande connaissance du milieu scientifique ce qui sera toujours bénéfique pour la suite de nos études. Mais ce projet nous a surtout donné l'occasion de comprendre un phénomène que peu de personnes connaissent réellement.

Glossaire

ATP	Energie formée dans les mitochondries des cellules lors de la respiration cellulaire
Capillarité	Phénomène physique expliquant l'ascension d'un liquide dans un capillaire (tube fin)
Dièdre	Ensemble de deux demi-plans (ou <i>faces du dièdre</i>) qui ont une arête commune
Endoderme	Rangée de cellules petites et régulières. Les produits de la photosynthèse y sont stockés
Equilibre hydrique	Equilibre du rapport entre les apports et les pertes d'eau
Isotonique	Est dit lorsque la pression osmotique est annulée et que les concentrations sont égales
Loi de Jurin	Loi basée sur le phénomène de capillarité et qui détermine la hauteur atteinte par le liquide grâce à ce phénomène
Membrane plasmique	Membrane contrôlant les échanges entre le cytoplasme et l'extérieure de la cellule grâce à sa perméabilité sélective
Membrane semi-perméable	Membrane dont les pores laissent passer les molécules de solvant mais pas celles de la substance dissoute
Milieu hypertonique	Entre deux milieux, le milieu le plus concentré est dit milieu hypertonique
Milieu hypotonique	Entre deux milieux, le milieu le moins concentré est dit milieu hypotonique
Phénomène actif	Passage de l'eau avec apport d'énergie
Phénomène passif	Passage de l'eau sans apport d'énergie
Phloème	Vaisseaux conducteurs de la sève élaborée (descendante). Diamètre de l'ordre de 10^5 mètres
Plasmolyse	Lorsque le volume de la vacuole diminue, la cellule est dite en plasmolyse
Pression osmotique Sève brute	Pression engendrée par la différence de concentration entre deux solutions séparées par une membrane semi-perméable Elle est formée essentiellement d'eau et d'éléments minéraux. Absorbée par la racine, elle s'élève dans le xylème pour s'évaporer au niveau des feuilles
Sève élaborée	Elle est formée de produits issus de la photosynthèse (sucres, acides aminés et autres substances). Formée au niveau des feuilles, elle descend aux racines par le phloème et alimente les feuilles de sucres en cours de chemin
Stomate	Il est formé de deux cellules arquées se touchant par leurs extrémités et formant entre elles une ouverture appelée ostiole
Suc vacuolaire	Contenu de la vacuole
Vacuole	Compartiment hydrique des cellules végétales limité par une membrane
Van't Hoff	Chimiste néerlandais, il découvrit les lois de la pression osmotique et reçut le prix Nobel en 1901
Xylème	Vaisseaux conducteurs de la sève brute (ascendante). Diamètre de l'ordre de 10^5 mètres

Bibliographie

Ouvrages ou sites généraux sur la montée de la sève dans les arbres

- ✂ Biologie Géologie 1^{ère} S collection Tavernier
- ✂ Biologie Géologie 1^{ère} S collection J.Escalier
- ✂ Physiologie végétale de René Heller, Robert Esnault et Claude Lance, Editions Dunod
- ✂ Dossier hors série Pour la science de janvier 2000 : De la graine à la plante. En particulier l'article : « Les sèves et leur circulation » de S.Delrot.
- ✂ Pour la Science N° 272 juin 2000, « La montée de la sève » par Roland Lehouq
- ✂ La Recherche N°220 avril 1990, « La montée de la sève dans les arbres » par Pierre Cruizat et Melvin T. Tyree
- ✂ Expérimentation en physiologie végétale de R.Prat
- ✂ La physique de tous les jours, article : Des pompes à eau silencieuses et efficaces de J.M. Levy-Leblond
- ✂ <http://perso.wanadoo.fr/biodeug/Pv/pv24.htm>
- ✂ <http://www.unil.ch/lpc/docs/guide02/trans.pdf>
- ✂ <http://ici.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/bionya/plantes/botanique.htm> (chapitre 32)
- ✂ <http://ici.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/bionya/plantes/powerpoint/chap31labo2/>

Ouvrages ou sites sur le thème de l'osmose

- ✂ Nouveau manuel de l'UNESCO pour l'enseignement des sciences, presses de l'UNESCO, 1974
- ✂ <http://perso.wanadoo.fr/bernard.pironin/osmose01.htm>
- ✂ <http://www.ulg.ac.be/virofond/biogen/page13.htm>

Ouvrages ou sites sur le thème de la tension superficielle et la capillarité

- ✂ http://www.unice.fr/zetetique/polycop_uef.pdf
- ✂ http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/TP-phys/Term/TP-fluid/Tension_sup.htm
- ✂ http://www.ac-creteil.fr/lycdarsonvalstmaur/documents/Bts_html/TPbts/Tensio/TSTENSIO.htm
- ✂ Gouttes, bulles, perles et ondes de Pierre-Gilles de Gennes, Françoise Brochard-Wyart et David Quéré. Editions Belin, 2002

Ouvrages ou sites sur le thème de la transpiration

- ✂ La Recherche N°220 avril 1990, « La montée de la sève dans les arbres » par Pierre Cruizat et Melvin T. Tyree
- ✂ <http://wwwusers.imagnet.fr/~pol/3TRANSPI.html>