

## 27/02/2024 **Quelques expériences autour de la capillarité afin d'illustrer comment la sève monte dans les arbres (P. Roudeau)**

Ceci est un complément aux montages déjà réalisés pour cet atelier par « La Compagnie ». Le terme capillarité s'emploie par référence au comportement de liquides dans des tubes très fins, comme un cheveu. Ce terme se généralise au comportement de liquides en contact avec des surfaces de natures différentes (rigides, poreuses, granuleuses ; constituées de matériaux variés).

**Contact :** patrick.roudeau@ijclab.in2p3.fr

### **Plan :**

- + 1- explication qualitative du phénomène de capillarité ;**
  - + 2- illustration de la montée de l'eau par capillarité le long de parois ;**
  - + 3- illustration des forces entre l'eau et une paroi ;**
  - + 4- illustration des forces entre molécules d'eau ;**
  - + 5- on combine tout cela, on ajoute l'évaporation et on a un modèle d'arbre ... très simplifié.**
  - + 6- quelques compléments.**
- 

Le sujet traité ici est à rapprocher de l'atelier sur les bulles de savon (« Et si on coinçait les bulles ! »):

<https://echosciences.nouvelle-aquitaine.science/articles/coincer-les-bulles>

car le moteur est le même : la structure de la molécule d'eau.

## 1- explication qualitative du phénomène de capillarité



Schéma simpliste de l'escalade de molécules d'eau sur deux parois (en vert). Les molécules d'eau sont des assemblages entre un atome d'oxygène (en rouge) et deux atomes d'hydrogène (en bleu). La liaison entre l'hydrogène et l'oxygène (petit trait bleu) se fait par la mise en commun d'un électron par chacun des atomes (voir dans les compléments une proposition pour illustrer comment deux atomes établissent une liaison). Dans ces molécules, les « trajectoires » des électrons les plus périphériques de chaque atome sont différentes de celles qu'ils occupaient dans les atomes indépendants. Les électrons, dans la molécule, sont plus liés aux noyaux qui la composent que dans les atomes individuels. D'autre part, dans le cas de la molécule d'eau, contrairement à des molécules comme  $H_2$  ou  $O_2$ , qui sont formées d'atomes identiques, il existe des zones qui sont un peu plus négatives (au voisinage de l'atome d'oxygène) et d'autres un peu plus positives (au voisinage de chaque atome d'hydrogène), même si la molécule  $H_2O$  est globalement neutre (voir la rubrique « compléments » à la fin de ce texte).

La distribution des électrons, dans une molécule d'eau, crée une zone négative autour de l'atome d'oxygène et positive autour des deux atomes d'hydrogène. Cette répartition induit des forces d'attraction entre l'oxygène et l'hydrogène appartenant à deux molécules différentes assurant la cohésion du liquide (liaisons hydrogène indiquées ici par un zig-zag noir). Au niveau de la surface il se crée une tension en tout point. Imaginons que l'on veuille éloigner deux molécules situées en surface afin d'augmenter celle-ci, des molécules situées au-dessous doivent monter en surface mais cela nécessite un certain travail pour les faire monter puisqu'elles sont préférentiellement « tirées » vers le bas par leurs voisines (car elles interagissent beaucoup moins avec l'air situé au-dessus). Tout se passe comme si la surface du liquide était recouverte par un film invisible. Parfois on parle de « la peau de l'eau » mais cela est inexact car il s'agit d'eau tout simplement.

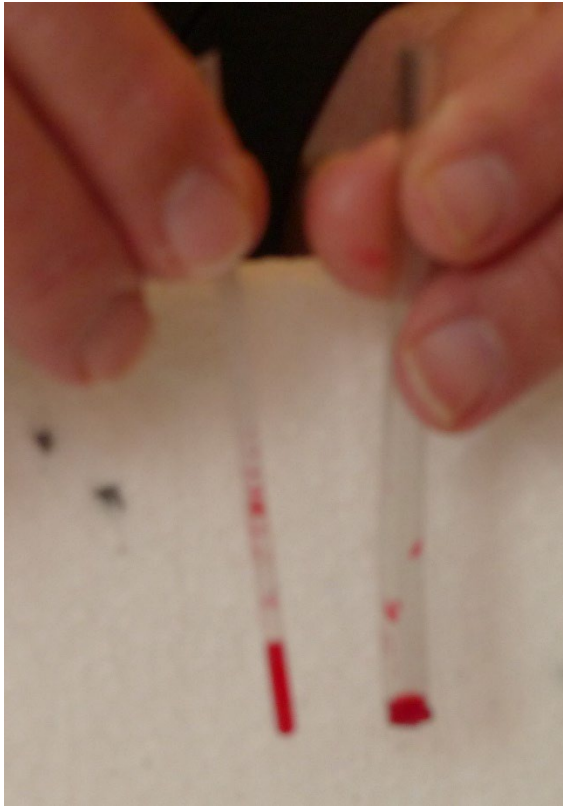
D'autres phénomènes similaires, d'attraction entre charges de signes opposés, entre les molécules d'eau et les constituants des parois, permettent à l'eau de progresser le long de ces parois (représentées ici par des crochets). Cette progression est limitée car les molécules progressant sur la paroi entraînent d'autres reliées à elles par les liaisons-hydrogène. Un ménisque se forme à l'interface eau-paroi. L'eau ne peut réellement progresser dans un tube ou bien entre deux parois que si le diamètre du tube ou bien la distance entre parois est inférieure ou voisine du rayon de ce ménisque.

Si tel est le cas, la hauteur à laquelle monte le liquide correspond au poids du liquide pouvant être soulevé par les forces qui attirent l'eau le long de la paroi.

Noter que **cette montée de liquide ne nécessite pas un moteur, elle se fait « naturellement »**. La configuration des forces électriques correspond à une énergie plus faible lorsque de l'eau est montée sur la paroi que si elle reste au pied. C'est la même chose que la chute d'une pierre le long d'une montagne, sous l'effet, dans ce cas, de la gravité.

## 2- illustration de la montée de l'eau par capillarité le long de parois

- Jusqu'où l'eau monte, « toute seule », dans un tube de stylo ? un tube plus large ?



**Expérience :** on demande aux enfants de tremper, verticalement, des tubes de diamètres différents dans de l'eau colorée ; puis de les retirer. Les tubes sont en plastique et ouverts aux deux extrémités. Qu'observe-t-on ?

Du liquide a pénétré dans chaque tube et ne s'écoule plus, bien que les deux extrémités des tubes soient à l'air libre.

Dans le tube le plus fin (recharge de stylo à bille de diamètre interne voisin de 1 mm) le liquide est monté plus haut que dans l'autre dont le diamètre est de 5 mm.

La hauteur à laquelle l'eau peut monter dépend de la nature du tube (métal, verre, type de plastique) et de son diamètre. La hauteur est inversement proportionnelle au diamètre. Ici, on s'attend à ce qu'elle soit 5 fois plus faible dans le tube le plus large (pour des tubes formés du même matériau).

### Enseignements :

+ expliquer que l'eau est attirée par les atomes qui forment les parois. Cette attirance dépend de la nature de ces atomes (verre, métal, plastique, ...) Parfois elle est même repoussée (graisse, plumes du canard, ... parler de la manière dont les canards graissent leurs plumes ...)

+ des molécules d'eau montent ensemble car des forces les relient les unes aux autres (voir expérience 2-)

+ demander : « pourquoi s'arrêtent-elles de monter ? »

Réponse : la montée de l'eau s'arrête quand la force qui les tire vers le haut est égale au poids de l'eau tirée. Pour les enfants un peu âgés on peut peut-être retrouver le fait que la hauteur de l'eau est inversement proportionnelle au rayon du tube. En effet pour un tube, la force qui tire les molécules vers le haut est proportionnelle à sa circonférence puisque ces forces agissent en surface, à la jonction avec l'eau. Donc, cette force est proportionnelle au rayon du tube. Par contre le poids de l'eau qui est soulevée est proportionnel au volume de cette eau c'est-à-dire au produit de la surface de la section du tube par la hauteur de la colonne d'eau. La section du tube est proportionnelle au carré du rayon du tube. La force qui tire l'eau vers le haut étant égale au poids de l'eau soulevée on en déduit que la hauteur de la colonne est inversement proportionnelle au rayon du tube.

- **On remplace les tubes par deux lames de verre.**

On utilise 2 plaques de plexi. réunies par un Scotch sur un des côtés. Les côtés opposés sont séparés par une petite tige (très mince, ici en bambou) et l'écartement est maintenu par un élastique. Les 2 plaques forment un dièdre et la distance entre les plaques varie de façon continue depuis zéro jusqu'à une valeur maximale fixée par l'épaisseur de la tige.

On dépose ce dièdre verticalement sur une goulotte dans laquelle on met de l'eau colorée.

L'eau monte, par capillarité, à des hauteurs qui décroissent à mesure que l'écartement entre les plaques augmente (en allant de la position où les 2 plaques se touchent à celle où elles sont écartées par la tige). C'est un peu comme si l'on avait disposé côte-à-côte des petits tubes dont le diamètre augmente avec la distance entre les 2 plaques.



*Les deux dièdres sont posés au-dessus d'un peu d'eau colorée qui monte entre les deux plaquettes. Les plaquettes de gauche sont plus écartées que celles de droite par les petites tiges vertes. Les côtés verticaux situés à gauche de chacun des dièdres sont maintenus en contact par une bande verticale de Scotch transparent qui fait office de charnière. Les plaquettes font 7 cm de longueur, 5 cm de largeur et 2 mm d'épaisseur. Les irrégularités dans les hauteurs atteintes par l'eau proviennent de celles des plaques de plexi. Avec des plaquettes en verre ce serait plus régulier mais nous avons préféré utiliser du plastique qui est moins dangereux lors des manipulations.*

**Expérience :** on fournit à chaque enfant (ou binôme) un jeu de 2 plaquettes réunies par un Scotch. Les plaquettes doivent être sèches et propres. Ils choisissent une tige, pour les écarter, et un élastique pour que l'ensemble soit rigide.

Le dièdre ainsi formé est disposé verticalement sur un support. Les enfants disposent du colorant à la base avec une pipette et observent la montée de l'eau colorée entre les plaquettes.

### **Enseignements :**

+ on voit, par rapport à l'expérience précédente, que l'eau peut monter sur plusieurs centimètres. Pour cela la distance entre plaques doit-être très petite.

+ la variation entre la hauteur et la distance entre les plaques est « visuelle » ;

+ pour les plus âgés ils peuvent faire des mesures et vérifier que la hauteur de l'eau est inversement proportionnelle à la distance au sommet du dièdre.

Site avec explications et manip sur capillarité et osmose

[http://jl.domec.free.fr/siteDjl\\_fichiers/1ES\\_L/NourrirHuman/Funsci\\_com\\_SurfactantColloid.htm](http://jl.domec.free.fr/siteDjl_fichiers/1ES_L/NourrirHuman/Funsci_com_SurfactantColloid.htm)

### ● **utilisation de Sopalin**

Le sopalin est, comme tout papier, fabriqué à partir du bois. Le bois : énorme bouquet de canaux, appelés fibres (microscopiques). Le sopalin ne se déchire droit que si on le prend dans le sens des fibres.

On peut, simplement, faire tremper l'extrémité d'une feuille de sopalin, suspendue verticalement, dans de l'eau colorée et voir que l'eau monte progressivement.

L'eau s'arrête de progresser après quelques centimètres sans doute à cause du fait que l'évaporation augmente (?).

On va maintenant étudier chacune des deux forces qui permettent à l'eau de monter à une surface.

### 3- illustration des forces entre l'eau et une paroi

On dispose de 2 petites plaquettes de plexiglass sur lesquelles on a collé un demi-bouchon muni d'un anneau. Sur une des plaquettes on a suspendu à l'anneau une clémentine, de 140 g pour ce test. **Comment tenir cet ensemble en n'utilisant que l'autre plaquette et un peu d'eau ?**



*Dans la main gauche : une clémentine est suspendue à une petite plaquette de plexiglass. Comment tenir cet ensemble en n'utilisant que l'autre plaquette, avec la main droite, et ... un peu d'eau.*



**Et voilà ! Comment a-t-on fait ?**

**Expérience :** les enfants essaient tour à tour de soulever la clémentine après avoir mis un peu d'eau entre les deux plaquettes.

**Enseignements :**

- + les enfants acquièrent « le tour de main » : il ne faut pas trop d'eau, bien chasser l'air entre les plaquettes. Il faut que la force s'exerce bien verticalement et que les plaquettes soient horizontales ;
- + faire observer que les plaquettes se détachent aisément en les faisant glisser horizontalement, l'une par rapport à l'autre ;
- + faire remarquer que ces forces, de nature électrique, sont puissantes puisque les petites plaquettes peuvent contrebalancer l'attraction de la Terre.

## 4- Illustration des forces entre molécules d'eau

- illustrer les forces électriques



*En utilisant un tuyau en plastique frotté avec un tissu on peut attirer divers petits objets : cylindres en mousse, papier d'alu., papier journal ...*

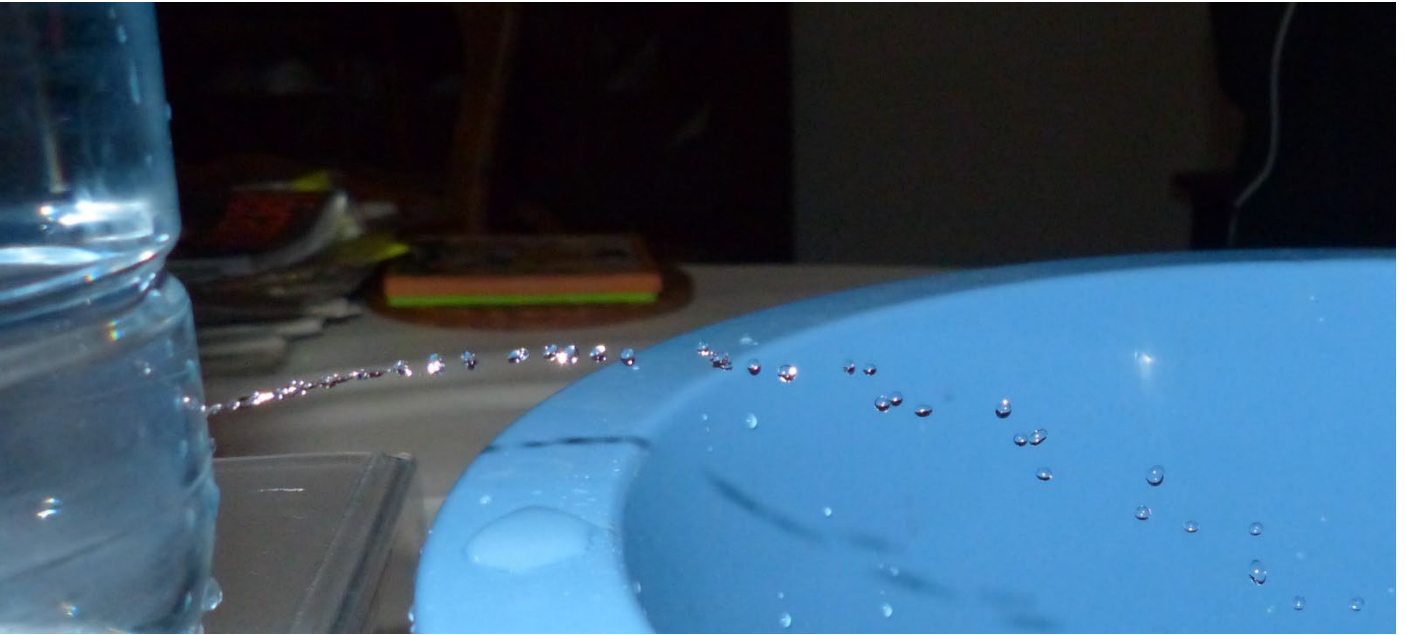
**Expérience :** les enfants frottent le cylindre (ou/autre tige) en plastique et attirent les objets. C'est la force électrique qui est responsable de ces mouvements.

**Enseignements** (pas pour les plus jeunes)

- + au départ aucun objet (tube, petits morceaux) n'est chargé d'électricité ;
- + expliquer que le fait de frotter le tube enlève des électrons (négatifs) et que le tube devient positif.
- + le tube va attirer les charges négatives des petits objets mais pas suffisamment pour que ces charges puissent les quitter, si la force est assez grande, les objets se déplacent.
- + demander aux participants de citer des exemples où intervient cette force électrique ... et leur donner la notion qu'elle est partout et pas seulement dans les moteurs électriques, les éclairages, ... La force électrique gouverne toutes les réactions chimiques et biologiques, elle assure la solidité de la matière autour de nous, ...



- déviation d'un petit jet d'eau



*Un mince filet d'eau s'échappe d'un petit trou percé dans une bouteille en plastique.*

Remplir d'eau une bouteille en plastique qui a été percée au bas par un petit trou. Pour stopper le jet d'eau qui coule, il suffit de fermer le bouchon de la bouteille. Demander pourquoi l'eau ne coule plus alors que la bouteille est percée ? (réponse : c'est l'action de la pression atmosphérique.)

Ouvrir le bouchon de la bouteille afin de rétablir le jet et approcher un tube de plastique frotté.



*L'approche du tuyau de plastique frotté dévie le jet d'eau vers le haut.*

### Enseignements :

En réalité cette expérience, qui est souvent présentée comme une illustration du caractère polaire des molécules d'eau ... n'est pas réellement une démonstration de cet effet. Voir le site :

<http://www.ampere.cnrs.fr/histoire/laboratoire-historique/corpslegers>

où ils concluent que l'effet de la polarisation est très bref (imperceptible), dès que l'on approche le tube électrisé, mais qu'ensuite c'est le mouvement des charges des ions présents dans l'eau qui vont faire l'effet principal... Donc c'est en gros comme avec les petits morceaux de papier.

On retiendra simplement que des charges électriques de signe opposé s'attirent par une force qui peut être plus importante que celle de la Terre (la gravitation) : les papiers et l'eau se soulèvent.

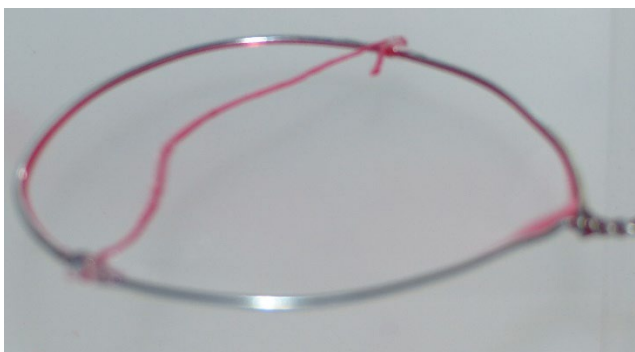
### • forces existant à la surface de l'eau

Pour illustrer ces forces nous allons utiliser de l'eau savonneuse. Cela permet d'isoler une lame d'eau entre deux couches de détergent.

**Expérience :** À l'aide de petits montages en fil de fer on illustre la présence des forces reliant entre-elles les molécules d'eau. Voir par exemple sur le site :

<https://pod.univ-lille.fr/physique-a-main-levee/mecanique-des-liquides/>

Dans cet exemple on a trempé un cercle de fil de fer dans de l'eau savonneuse. Un fil à coudre est fixé à ses 2 extrémités sur le cercle. Le fil n'est pas tendu.



*Une lame d'eau savonneuse occupe tout le cercle (désolé elle n'est pas visible...). Le fil reste détendu et adopte une position quelconque. En chaque point s'exerce une force qui le tire vers la droite et une force identique qui le tire vers la gauche.*



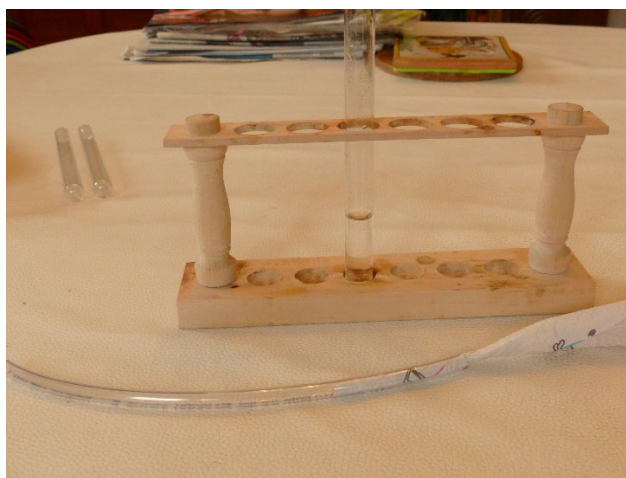
*On a crevé la partie droite de la lame d'eau. Le fil se tend alors sous l'action des forces qui le tirent vers la gauche.*

**Enseignements :**

- + les forces agissant sur le fil sont dues à l'attraction entre les molécules d'eau ;
- + la surface de la lame d'eau est la plus petite possible de manière à ce que l'énergie stockée dans la lame soit la plus faible possible. Ceci peut être illustré en remarquant que des gouttes d'eau posées sur une plaque et que l'on rapproche, forment des gouttes de plus en plus grandes. En effet, la surface d'une grosse goutte est plus faible que la somme des surfaces d'un ensemble de gouttes plus petites contenant, au total, la même quantité d'eau.

## 5- on combine tout cela, on ajoute l'évaporation et on a un modèle d'arbre ... très simplifié.

On peut montrer qu'un simple réseau mince de tubes très fins placé à l'extrémité d'un tube qui les contient tous a suffisamment de force pour maintenir la colonne d'eau du tube le plus large sans qu'il soit nécessaire que les tubes fins occupent tout le volume. Pour les arbres, l'équivalent du gros tube seraient les canaux conduisant la sève dans le tronc (trachéides) dont le diamètre est typiquement de 30 micromètres et le réseau de tubes fins seraient les ouvertures formées par les **stomates**, au niveau des feuilles, qui sont en gros mille fois plus petits. Le sopalin, formé de fibres qui définissent de très fins canaux, va représenter l'action des feuilles de l'arbre.



*On dispose d'un tuyau transparent (longueur de 23 cm et 6 mm de diamètre) que l'on a « fermé » par une ½ feuille de sopalin roulée de manière à pénétrer dans le tube. Dans un tube à essai plus large on a mis de l'eau.*

### Expérience :

- + Chaque participant ou binôme dispose d'un tube à essai et d'un tuyau équipé avec un bouchon de Sopalin.
- + On remplit le tuyau d'eau, à ras, doucement avec une pipette, en chassant les bulles d'air. Presser notamment au niveau du bouchon de sopalin de manière à faire partir l'air et assurer l'étanchéité du bouchon une fois imprégné d'eau.
- + Retourner le tuyau et le mettre dans le tube à essai, jusqu'au fond. Veiller de nouveau à ce qu'il n'y ait pas de bulle d'air piégée. Si tout cela est fait, l'eau reste dans le tuyau vertical. Sinon son niveau baisse assez vite dans le tuyau (fuite d'air).
- + Mettre un peu de colorant dans l'eau du tube à essai (opération anodine mais lors de laquelle j'ai cassé trois tubes et dispersé l'eau colorée un peu partout en voulant homogénéiser le colorant dans l'eau du tube ...) et marquer avec un feutre le niveau de l'eau dans le tube.



*Dispositif en place ; on a noté le niveau de l'eau dans le tube.*

Le papier sopalin qui déborde du tuyau devient vite humide et au bout de 20' on note que le niveau de l'eau a baissé nettement dans le tube.



*Résultat au bout de 3 heures. L'eau a baissé de 2 cm environs (distance entre les deux traits noirs)..*

### **Enseignements :**

- + avec ce dispositif on fait monter de l'eau dans un tuyau de 6mm de diamètre sur une hauteur très importante (nous n'avons pas testé la limite du dispositif mais il s'agit de plusieurs dizaines de centimètres) alors que, pour le tuyau seul, l'eau ne montait au mieux que d'un mm.
- + tout se passe comme si on utilisait les fins canaux du Sopalin depuis le bas du tuyau alors qu'ils sont, ici, au sommet de ce tuyau ;
- + prendre garde aux bulles d'air ! une bulle et le système se désamorçait. Ce problème intervient dans les arbres, une « embolie » peut causer la perte de branches ou d'autres canaux d'alimentation de sève ;

Digression : ne pourrait-on pas généraliser ce dispositif de manière à lui donner l'allure plus artistique d'un arbre :

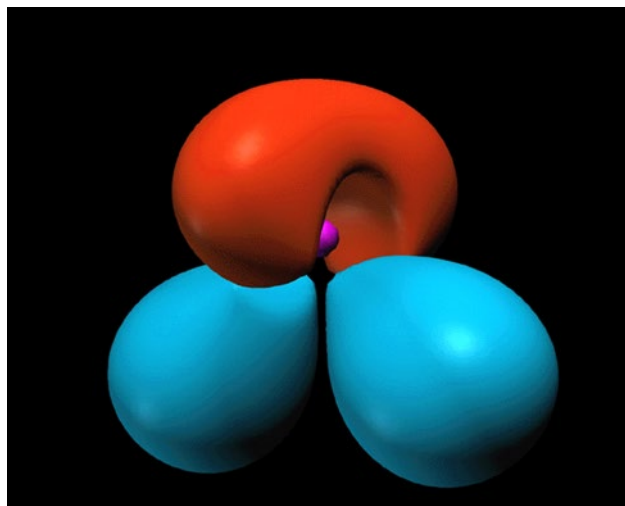
- + réseau de tuyaux plongeant dans un plus grand ;
- + terminer les tuyaux avec des morceaux sopalin, de buvard ( ? ), de crépon ( ? ) imitant mieux les feuilles.

## 6- quelques compléments.

### ► H<sub>2</sub>O, la molécule d'eau

Le lien suivant pointe sur l'image de la distribution des électrons dans la molécule d'eau :

<https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/douseau/decouv/proprie/images/moleauSilvi.htm>



Légende :

*La représentation proposée ci-contre, résultat d'un calcul rigoureux effectué par des scientifiques, montre les régions au sein desquelles la probabilité de trouver une paire d'électrons et une seule est la plus grande. La molécule d'eau possède en effet au total dix électrons dont huit proviennent de l'atome d'oxygène, les deux autres provenant des deux atomes d'hydrogène.*

*Les lobes bleus figurent les domaines où se situent préférentiellement les paires d'électrons qui assurent les liaisons oxygène - hydrogène au sein de la molécule (une paire pour chaque liaison). La petite sphère rose matérialise le domaine des deux électrons de l'atome d'oxygène qui ne participent pas aux liaisons chimiques, et que l'on appelle des électrons " de cœur ".*

*Enfin, le domaine orangé correspond aux 4 derniers électrons de l'atome d'oxygène groupés par paires. Ces électrons dits " libres ", très importants, sont ceux qui permettent la formation des fameuses liaisons hydrogène.*

### ► Explication de la montée de la sève brute : ref Marc Sautreau et Pierre Cruziat « la capillarité et les plantes » :

« Les forces de cohésion entre les molécules d'eau vont permettre de maintenir un continuum liquide entre le sol et les feuilles malgré les niveaux de tensions très importants. Dans cette théorie, la **capillarité** joue un rôle notamment via la loi de Jurin car c'est la "pompe" qui va tirer l'eau au niveau des feuilles.

Pour l'illustrer, appliquons la loi de Jurin (Eq. 10) aux « capillaires » observables au niveau des plantes. A partir des données de diamètre des vaisseaux conducteurs du **xylème** (par exemple d'un rayon de 25µm) et en considérant un mouillage maximal ( $\theta = 0$ ), la loi de Jurin conduit à une hauteur de montée de la sève de 57,08 cm. Or les arbres, et parfois très grands (plus de 100 m pour certains),

existent et fonctionnent parfaitement ! Dans la réalité les vaisseaux hydrauliques ne débouchent pas directement à l'air libre car l'évaporation **de l'eau liquide s'effectue via des microfibrilles cellulaires au sein des chambres stomatiques. Ces microfibrilles créent des ménisques dont le rayon est de l'ordre de 10 nm (1 nm = 10<sup>-9</sup> m). Appliquons alors la loi de Jurin (Eq. 10) à ces microménisques. La hauteur d'eau admissible est alors de 1427 m et induit une dépression (Eq. 8) entre l'air et l'eau contenue dans la feuille de -14 MPa.** Bien sûr, aucun arbre n'atteint cette taille, car d'autres contraintes, mécaniques et fonctionnelles, vont jouer un rôle prépondérant et limiter leurs tailles. »

► peut-être rappeler l'importance des arbres pour lutter contre la sécheresse.

Christophe Colomb avait observé que le climat des îles de Madère et de Porto-Santo avait été transformé par un déboisement sévère :

Deuxième question : d'où Colomb a-t-il tiré l'idée a priori étrange que la forêt « génère » la pluie ? La théorie climatique du navigateur génois tient à son expérience directe du premier « choc écologique » de l'histoire. Les îles de Madère et de Porto-Santo –vierges d'hommes avant l'arrivée des Portugais en 1419– connaissent en quelques décennies des changements environnementaux brutaux. Madère, « l'île du bois » devient en quelques décennies le premier centre mondial de production de sucre. Dans les années 1450, capitaux européens et esclaves africains convergent vers Madère pour en faire la première économie de plantation de l'histoire. Or la production de sucre est très énergivore. Vers 1510, un tiers de la surface de l'île avait été déboisée, en particulier le long des côtes. Faute de bois pour alimenter les raffineries et aussi du fait de l'appauvrissement des sols, la production sucrière s'effondre.

En tant que marchand génois établi à Lisbonne dans la décennie 1470, Christophe Colomb a directement profité du boom sucrier. Mieux, en 1478, il épouse Felipa Moniz, la fille du conquistador de Porto Santo. Colomb est donc bien placé pour comprendre le bouleversement environnemental de la colonisation. Des anecdotes contemporaines soulignent d'ailleurs cette transformation. Selon une chronique portugaise, le beau-père de Colomb, abordant l'île de Porto Santo en 1418, y aurait introduit des lapins qui auraient proliféré tant et plus qu'ils auraient rendu l'agriculture impossible. Un récit en particulier a dû nourrir la réflexion climatique de Colomb : il concerne l'île de Fer (la *isla de Hierro*), à savoir

Je pense que les habitants de l'île de Pâques ont également ce problème. Pour Madagascar, il paraît que la forêt y disparaît le plus vite au monde ; est-ce que la sécheresse dont ils sont victimes est liée ?