

UNE INTRODUCTION À LA BIOMÉCANIQUE DES PLANTES

Loïc Tadrist
loic.tadrist@uliege.be

Objectifs

Ce cours est une introduction à la biomécanique des plantes et aux applications biomimétiques que l'on peut en tirer. Il est destiné à des étudiants en ingénierie ou en physique s'ouvrant à des approches nouvelles en mécanique. La physique des plantes est un milieu fascinant où se côtoient physique, mécanique et biologie. Les questions abordées ici, se focalisent sur l'aspect mécanique et ingénieur.

1 De la forme des troncs d'arbre

Dès leur naissance, juste après la germination, les arbres se lancent dans une compétition à la lumière et aux ressources nutritives du sous-sol. Dans un premier temps, nous considérerons que l'arbre pousse dans un milieu équilibré en minéraux avec suffisamment de dioxyde de carbone, d'oxygène et d'eau pour sa croissance. Dans un milieu aussi favorable, l'arbre doit pousser plus haut que ses congénères pour obtenir un maximum d'illumination sur son feuillage. C'est la compétition pour la lumière. S'il ne grandit pas assez haut, d'autres arbres le couvriront de leur feuillage et il n'aura accès qu'à une quantité de lumière limitée. Dans ces conditions défavorables, certains arbres peuvent végéter durant des décennies en attendant qu'un arbre plus grand meure et leur laisse enfin accès à la lumière et donc à l'énergie.

Ces considérations biologiques déclenchent chez le physicien ou l'ingénieur des questions plus appliquées : Quelles sont les limites physiques à la hauteur des arbres ? Le bois est-il un bon matériau pour grandir haut ? Quelle est la forme optimale que doit avoir le tronc ?

Ces questions apparemment assez simples sont en fait plutôt complexes à cause de l'intrication des phénomènes physiques, biologiques, mécaniques et de l'influence de l'environnement. Beaucoup de limites physiques à la hauteur des arbres peuvent coexister : amener l'eau jusqu'aux feuilles peut-il être réalisé avec des pressions négatives ? Quel est le coût énergétique des réparations aux embolies des arbres les plus haut ? L'arbre peut-il soutenir son propre poids ? Est-ce que la quantité d'énergie dépensée pour créer un tronc épais est intéressante par rapport à celle dépensée pour être plus souple ?

Enfin, il faut se souvenir que la plante est un objet vivant qui "mesure" son environnement et répond aux stimuli extérieur en ajustant sa croissance, ses propriétés, sa forme, etc. Ce cours explore quelques questions simples du point de vue de l'ingénieur biomimétique : l'observation de la nature déclenche des questions de mécanique sans pour autant que nous cherchions les causes biologiques réelles à certaines observations.

1.1 Grandir haut : le risque de flambement du tronc

1.1.1 Feuillage massif

En modélisant le tronc comme une poutre élastique sans masse de module de rigidité EI , supportant le poids du feuillage Mg , le tronc prends une forme $\theta(s)$ défini par l'équation

$$\frac{d^2\theta}{ds^2} + \frac{Mg}{EI} \sin(\theta) = 0 \quad (1)$$

où $(\theta(s), s)$ sont les coordonnées curvilignes. Une méthode de dérivation élégante à partir de considérations énergétiques est proposée en 1.1.4. L'intégrale première de cette équation apparaît après avoir multiplié par $d\theta/ds$,

$$\frac{d^2\theta}{ds^2} \frac{d\theta}{ds} + \frac{Mg}{EI} \sin(\theta) \frac{d\theta}{ds} = 0 \quad (2)$$

On intègre cette équation entre s et L pour bénéficier de la condition aux limites $(d\theta/ds)_L = 0$, correspondant à une absence de moment en bout de la poutre. On

utilise l'inconnue $\theta_L = \theta(L)$, on obtient,

$$\frac{d\theta}{ds} = \sqrt{\frac{2Mg}{EI} (\cos(\theta) - \cos(\theta_L))} \quad (3)$$

Notre analyse s'intéresse maintenant au flambement, c'est à dire au moment où il devient plus intéressant d'un point de vue énergétique de plier plutôt que de rester droit. On va donc prolonger notre analyse aux petits angles, $\theta \leq \theta_L \ll 1$ en supposant $\theta_L > 0$, on peut écrire,

$$\frac{d\theta^*}{\sqrt{1 - \theta^{*2}}} = \sqrt{\frac{MgL^2}{EI}} ds^* \quad (4)$$

avec $\theta^* = \theta/\theta_L$ et $s^* = s/L$. Cette équation s'intègre en

$$\arcsin \theta^* - \arcsin(0) = \sqrt{\frac{MgL^2}{EI}} s^* \quad (5)$$

Cette équation, évaluée en L , donne,

$$\arcsin 1 - \arcsin(0) = \sqrt{\frac{MgL^2}{EI}} \quad (6)$$

a une solution si et seulement si

$$\sqrt{\frac{MgL^2}{EI}} = \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Si cette condition n'est pas remplie, l'arbre n'est pas courbé. L'unique solution est $\theta(s) = 0$ correspondant à la solution non fléchie. La condition de non-flambement est donc

$$L \leq \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{4Mg}}. \quad (8)$$

Cette condition est connue sous le nom de flambement d'Euler.

1.1.2 Tronc massif

Pour une poutre massive (en tenant compte maintenant du poids de la poutre), la condition de non-flambement est plus compliquée à obtenir. La condition de non-flambement devient,

$$L_c \leq \left(1.95 \frac{ER^2}{\rho g} \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Je vous encourage à vous référer à la publication de Greenhill (1881) pour en avoir la démonstration exacte.

1.1.3 Résumé

Lors du design d'un arbre, selon si le poids du feuillage, ou bien le poids du tronc est dominant, la plante doit être bien plus courte que les deux longueurs de flambement présentées ci-dessus pour éviter de plier sous son propre poids. Le design de la plante peut s'éloigner de cette contrainte en utilisant de la matière pour renforcer le rayon du tronc.

$$\begin{aligned} L &\propto R^2 \\ L &\propto R^{2/3} \end{aligned}$$

FEUILLAGE MASSIF
TRONC MASSIF

POUR ALLER PLUS LOIN :

Greenhill, A.G. (1881). *Determination of the greatest height consistent with stability that a vertical pole or mast can be made, and of the greatest height to which a tree of given proportions can grow*. **Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**.

McMahon, T. (1973). *Size and shape in biology*. **Science**, 179(4079), 1201-1204.

Tadrist, L., & Darbois-Texier, B. (2016). *Are leaves optimally designed for self-support? An investigation on giant monocots*. **Journal of theoretical biology**, 396, 125-131.

1.1.4 Dérivation des équations des poutres par la méthode variationnelle

On modélise le tronc de l'arbre comme une poutre de longueur L , sans masse, ayant un module de rigidité $B = EI$. Le module de rigidité est simplement le produit du Module d'Young de la poutre E par le second moment d'aire I . Dimensionnellement, le module d'Young E a la dimension d'une pression (Pa) et caractérise l'élasticité d'un matériau. Le second moment d'aire, I a la dimension d'une longueur à la puissance 4, il dépend de la géométrie de la poutre. Pour une poutre cylindrique pliée perpendiculairement à son grand axe, $I = \pi R^4/4$.

Le tronc est chargé à son sommet par le feuillage et les branches qui ont une masse M , dans un champs de gravité g . La poutre est décrite avec les coordonnées curvilignes (s, θ) , avec comme conditions aux limites $\theta(0) = 0$ et condition finale $(d\theta/ds)_L = 0$. La condition limite en L traduit l'absence de moment à l'extrémité, seule une force est appliquée au bout de la poutre : le bout de la poutre n'est pas courbé. La description en coordonnée curviligne permet d'exprimer très simplement la courbure de la poutre $\mathcal{C} = d\theta/ds$.

Avec ce système de coordonnée, l'énergie de courbure de la poutre s'écrit

$$E_c = \int_0^L \frac{EI}{2} (\mathcal{C} - \mathcal{C}_0)^2 \quad (10)$$

où \mathcal{C}_0 est la courbure naturelle de la poutre. L'arbre est supposé pousser de manière rectiligne, $\mathcal{C}_0 = 0$.

$$E_c = \int_0^L \frac{EI}{2} \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 \quad (11)$$

L'énergie potentielle du feuillage est simplement,

$$E_p = Mgh = Mg \int_0^L \cos \theta \, ds \quad (12)$$

L'énergie totale du système est la fonctionnelle de l'énergie,

$$E[\theta] = \int_0^L Mg \cos \theta + \frac{EI}{2} \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 \, ds \quad (13)$$

De manière similaire à la recherche d'un minimum avec une fonction à valeur dans \mathbb{R} , on va dériver la fonctionnelle par rapport à θ en lui ajoutant une petite fonction $\delta\theta$, puis en trouver l'extremum. Par définition,

$$E[\theta + \delta\theta] - E[\theta] = \int_0^L \frac{\delta E}{\delta\theta} ds \quad (14)$$

Dans le cas du tronc d'arbre, nous avons,

$$E[\theta + \delta\theta] = \int_0^L Mg \cos(\theta + \delta\theta) + \frac{EI}{2} \left(\frac{d\theta + \delta\theta}{ds} \right)^2 ds \quad (15)$$

$$= \int_0^L Mg \cos(\theta) - Mg \sin(\theta) \delta\theta + \frac{EI}{2} \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 + EI \frac{d\theta}{ds} \frac{d\delta\theta}{ds} ds \quad (16)$$

Ici nous n'avons conservé que l'ordre 1 du développement en $\delta\theta$, supposant que l'incrément était infinitésimal. Il vient,

$$E[\theta + \delta\theta] - E[\theta] = \int_0^L -Mg \sin(\theta) \delta\theta + EI \frac{d\theta}{ds} \frac{d\delta\theta}{ds} ds \quad (17)$$

$$= \int_0^L -Mg \sin(\theta) \delta\theta - EI \frac{d^2\theta}{ds^2} \delta\theta ds + EI \underbrace{\left[\frac{d\theta}{ds} \delta\theta \right]_0^L}_{=0} \quad (18)$$

La partie intégrée est nulle à cause des conditions aux limites en effet $(d\theta/ds)_L = 0$ et $\theta(0) = 0 \rightarrow \delta\theta(0) = 0$. On trouve ainsi la dérivée fonctionnelle de l'énergie,

$$\frac{\delta E}{\delta\theta} = -Mg \sin(\theta) - EI \frac{d^2\theta}{ds^2}. \quad (19)$$

La forme qui minimise donc l'énergie de ce système répond à l'équation suivante,

$$\frac{d^2\theta}{ds^2} + \frac{Mg}{EI} \sin(\theta) = 0. \quad (20)$$

Cette équation est l'équation des poutres sous chargement. Elle est valable pour des grands ou des petits déplacements (mais toujours dans le cadre des petites déformations).

1.1.5 Équivalence de la relation avec l'équation des poutres

L'équation des poutres classique en petits déplacements sous chargement est

$$\frac{d^4y}{dx^4} + \frac{Mg}{EI} \frac{d^2y}{dx^2} = 0 \quad (21)$$

En petit déplacements ($dy \ll dx$), les coordonnées curvilignes se simplifient beaucoup, $ds = \sqrt{dy^2 + dx^2} \sim dx$ et $\tan(\theta) = dy/dx \ll 1$ de sorte que $\tan \theta \sim \sin \theta \sim \theta$.

$$\frac{d^2\theta}{ds^2} + \frac{Mg}{EI} \sin(\theta) = 0 \iff \frac{d^3y}{dx^3} + \frac{Mg}{EI} \frac{dy}{dx} = 0 \quad (22)$$

En dérivant cette expression on retombe naturellement sur l'équation classique.

	BOIS	ACIER	BÉTON
ρ (kg.m ⁻³)	450-1200	7500-8100	2200-2500
E (GPa)	10-20	210	20-50
R (m)	0.1	0.1	0.1
L_c (m)	31	37	27

TABLE 1 – Propriété des matériaux de construction et longueur critique de flambe-
ment. Le bois est un bon matériau pour pousser haut.

1.1.6 Constraintes biologiques

Cette contrainte biologique sur la croissance de l’arbre doit être mise en relation avec les pressions biologiques extérieures sur l’arbre : l’accès aux réserves d’eau ou la présence d’une sécheresse, l’accès à un sol riche, la présence de vent, la présence d’autres arbres à proximité, l’élagage, ou d’autres stress biotiques peuvent changer complètement la loi d’échelle présentée ici.

De plus, il faut bien garder à l’esprit que la forme de l’arbre résulte d’un processus de croissance continu pour lequel il a été prouvé que des contraintes résiduelles existent et permettent d’ailleurs à l’arbre de pousser droit ! Cette science, la thig-momorphogénèse est en plein essor aujourd’hui.

1.1.7 Le bois un bon matériau pour pousser haut ?

Si l’on calcule maintenant la longueur de flambage, on se rend compte que le bois est un bon matériau pour grandir haut, meilleur que le béton mais un peu moins bon que l’acier, voir table 1. Pour grandir plus haut, les arbres doivent investir dans des troncs plus épais et cela est guère efficace : la masse de l’arbre varie $m \propto LR^2$ et $L \propto R^{2/3}$ (tronc massif) donc $L \propto m^{1/4}$. Une augmentation en masse de 10% ne permet d’augmenter la taille de l’arbre que de 2,5%.

1.2 Résister aux tempêtes : les stratégies opposées du chêne et du roseau

Les arbres forment leur tronc de manière à ne pas s’écrouler sous leur propre poids. Ils doivent aussi être assez fort pour résister aux vents. Si au moindre coup de vent, l’arbre tombe, il perd définitivement la course à la lumière. Les recherches dans ce domaines sont assez intenses pour des raisons financières liée à l’activité d’agroforesterie. On fait pousser des forêts pour produire de la biomasse (bois, granules pour chauffage, etc.) Les forestiers redoutent les tempêtes qui brisent les troncs d’arbres (volis) ou déracines les arbres (chablis).

Chez les plantes, deux stratégies ont été mises en place pour résister au vent. La première est celle du chêne : bâtir assez solide pour ne pas se briser sous le vent. La seconde, plus sioux, est celle du roseau : plier pour ne pas subir le vent.

1.2.1 Tenir face au vent : la stratégie du chêne

Nous modélisons le chêne comme une poutre élastique déformée par une force due au vent F parallèle au sol s'appliquant sur son sommet. Pour résister au vent sans se briser, il faut que la contrainte dans la poutre soit inférieure à la contrainte maximale à la rupture. La contrainte maximale se situe en peau (au bord de la poutre).

En tout point de la poutre, le vent crée un moment $M = F(L - s)$ qui tend à plier la poutre.

$$M = EI(s) \frac{d\theta}{ds} = F(L - s) \quad (23)$$

La contrainte en peau est proportionnelle à la courbure et au rayon de la poutre $\sigma \propto ER \frac{d\theta}{ds}$, en d'autres termes,

$$\sigma \propto \frac{RF(L - s)}{I(s)} = \frac{4F(L - s)}{\pi R(s)^3} \quad (24)$$

Pour avoir une contrainte en peau constante, il faut que $R \propto (L - s)^{1/3}$. Le tronc doit s'élargir vers le bas.

Reconfiguration fragile

Une autre stratégie utilisée par le chêne pour survivre aux vents les plus violents est la reconfiguration fragile. L'idée est de créer des branches de plus en plus fragiles au vent à mesure que l'on s'éloigne du tronc. En cas de fort vent, les branches les plus fragiles seront donc élaguées les premières réduisant de fait la prise au vent de l'arbre et donc les moments appliqués au tronc. L'arbre aura certes perdu ses éléments les plus faibles (feuilles, petites branches) mais son intégrité physique globale sera préservée.

Cette idée est en accord avec l'observation de Léonard de Vinci pour les arbres : « toutes les branches issues d'une branche mère sont égales en épaisseur à la branche mère ». Ainsi, si deux branches filles sont issues d'une branche mère avec une allométrie $1/2$, $R_f = R/2$, la charge aérodynamique est elle aussi divisée par 2, $F_f = F/2$, ainsi que la longueur de la branche. On obtient alors $\sigma_f = 2\sigma$: la contrainte dans la branche fille est deux fois plus importante que dans la branche mère. La branche fille se rompra avant la branche mère protégeant les organes de l'arbre les plus importants. Ce raisonnement tient pour toute allométrie dégressive.

POUR ALLER PLUS LOIN :

Eloy, C. (2011). *Leonardo's rule, self-similarity, and wind-induced stresses in trees*. *Physical Review Letters*, 107(25), 258101.

Lopez, D., Michelin, S., & De Langre, E. (2011). *Flow-induced pruning of branched systems and brittle reconfiguration*. *Journal of Theoretical Biology*, 284(1), 117-124.

1.2.2 Reconfiguration élastique : le roseau

La stratégie la plus répandue chez les plantes pour résister aux vents les plus forts est de ployer sous l'effet du vent. Le fait de ployer va permettre à la plante de réduire sa prise au vent. Les efforts aérodynamiques sont moins importants et les risques de chablis ou de volis sont réduits.

Nous allons encore modéliser l'arbre comme une poutre élastique. Une force fluide F agit sur la poutre élastique et la fait se courber. La force fluide s'appliquant sur la poutre est $F = \rho U^2 h w$. La déformation de la poutre avec la force F est compensée par les efforts élastiques dans la poutre. La courbure de la poutre à la base est environ $C = \pi/2h$. L'équilibre des moments en loi d'échelle est

$$EIC = Fh \iff \left(\frac{h}{L}\right)^3 \propto \frac{EI}{\rho U^2 w L^3} = C_Y^{-1} \quad (25)$$

C_Y est le nombre de Cauchy qui compare les efforts fluides aux efforts élastiques. La force de trainée F varie donc comme $U^2 h$ et h varie comme $C_Y^{-1/3} \propto U^{-2/3}$. Ainsi

$$F \propto U^{2-\nu} \quad \text{avec} \quad \nu = -\frac{2}{3} \quad (26)$$

L'élasticité d'un objet permet de réduire fortement sa traînée. ν est appelé coefficient de Vogel en hommage au biologiste qui l'a découvert en premier dans les années 1980.

POUR ALLER PLUS LOIN :

Vogel, S. (1989). *Drag and reconfiguration of broad leaves in high winds*. **Journal of Experimental Botany**, 40(8), 941-948.

de Langre, E., Gutierrez, A., & Cossé, J. (2012). *On the scaling of drag reduction by reconfiguration in plants*. **Comptes Rendus Mécanique**, 340(1-2), 35-40.

1.3 Application en ingénierie

Construction de mats d'éoliennes et de bateaux respectant les critères présentés ci-dessus.

Dragage marin faible traînée (application militaire : sonars, application civile : fibre optique)

2 Réseau vasculaire de l'arbre : créer des flux sans muscles

L'arbre comme tout le monde végétal ne possède pas de muscle à proprement parler. Pourtant les plantes sont capables de mouvement. Ces mouvements sont lents la plupart du temps (tournesol qui suit la direction du soleil, mouvement de circumnutation dû à la croissance, déplacement lent des racines dans la terre lors de la croissance, etc.) Certaines plantes sont aussi capables de mouvements rapides comme pour la dionée qui referme son piège à insectes de manière très rapide, la

sensitive, *Mimosa pudica*, qui referme ses feuilles dès qu'on la touche ou encore la plante qui danse, *Desmodium Gyrans*, qui réagit à ses stimuli type vibration de l'air (musique).

Comment l'arbre, sans muscle, peut-il faire monter l'eau jusque à son sommet et faire descendre la sève jusque dans ses racines ?

2.1 Généralités sur les flux de liquides dans l'arbre

L'arbre possède un réseau complexe de vaisseaux capables de transporter l'eau et les nutriments depuis des points distants. L'eau est amenée depuis les racines vers les feuilles par le xylème. La sève élaborée est transportée des feuilles vers les racines dans le phloème. Ces vaisseaux sont un milieu poreux constitués de cellules faites pour conduire les fluides. La taille typique d'une cellule végétale est de $10 \mu\text{m}$.

2.2 Approvisionner les feuilles en eau : limites de la taille d'un arbre.

La montée capillaire peut-elle assurer la montée du fluide dans un arbre ?

Si l'on considère un ménisque ouvert de diamètre $2R = 10 \mu\text{m}$ (taille d'une cellule), la hauteur maximale de montée du fluide correspond à l'égalité de la pression hydrostatique ρgh avec la pression de Laplace $2\gamma/R$ (γ est la tension de surface entre l'eau et l'air). La hauteur maximale est donc

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g R} \quad (27)$$

$\gamma = 72 \text{ mN/m}$ pour de l'eau pure, $R = 5 \mu\text{m}$, $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ et $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$. Avec ces valeurs numériques, on obtient $h \simeq 3 \text{ m}$. La montée capillaire dans un tube est complètement impossible pour un expliquer la montée d'eau dans un arbre.

2.2.1 Théorie de la cohésion-tension

La théorie communément admise pour la montée capillaire est la théorie de la cohésion-tension. L'eau s'évapore au niveau des stomates des feuilles en passant par des interstices intercellulaires très petits (à l'intérieur d'une matrice de cellulose). Bien que l'eau dans les cellules de l'arbre soit en tension, c'est-à-dire mise à des pressions bien inférieures que la pression de vapeur saturante de l'eau $v_{\text{H}_2\text{O}} \ll P_0$, elle reste liquide dans un état métastable.

2.2.2 Pressions négatives dans un arbre

Quelle est la pression dans un arbre ?

L'arbre le plus grand du monde est un séquoia à feuille d'if qui atteint 115 m de haut ! Quelle est la pression en eau à l'intérieur de ses cellules proche du sommet ? La différence pression hydrostatique entre la base de l'arbre (entrée d'eau dans les racines proche de la pression atmosphérique, P_0) donne,

$$\Delta P = -\rho gh \iff P_{\text{sommet}} = P_0 - \rho gh \quad (28)$$

L'application numérique pour une hauteur de 115 m donne $P_{\text{sommet}} = -1.1 \cdot 10^6 \text{ Pa}$. La pression à l'intérieur des cellules est négative, et même très négative ! Moins dix fois la pression atmosphérique. Cela s'entend bien si l'on comprend la pression comme une force par unité de surface qui pousse sur la paroi. Ici une pression négative indique seulement une force entraînant de « tirer sur la paroi ».

L'eau à l'intérieur des cellules de l'arbre est donc dans un état métastable. La présence d'un centre de nucléation de bulle (type impureté) est catastrophique et conduit à de la cavitation à l'intérieur d'une cellule d'un arbre. Cette cavitation est appelée embolie chez les arbres car elle obstrue un canal conducteur de fluide. Si trop de cavitations arrivent en même temps, cela peut conduire à la mort de la plante (c'est ce qui conduit le plus souvent à la mort d'une plante lors des sécheresses d'été.) Les mécanismes de non-propagation de l'embolie aux cellules voisines sont bien compris mais les mécanismes de réparation sont eux encore mal connus.

La hauteur maximale d'un arbre sous la contrainte physique est que le potentiel chimique volumique de l'eau à l'intérieur de la feuille soit inférieur au potentiel chimique volumique de l'eau sous forme vapeur dans l'atmosphère.

$$\Psi_{\text{H}_2\text{O, feuille}} = -\rho g H + P_0 + \Psi_{\text{matrix}} \quad \text{et} \quad \Psi_{\text{H}_2\text{O, gaz}} = \frac{RT}{V_w} \ln \left(\frac{P_p}{P_v} \right) \quad (29)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau, g la gravité, H la hauteur de l'arbre, P_0 la pression extérieure, Ψ_{matrix} le potentiel chimique de l'eau liquide dans la cellulose, V_w le volume molaire de l'eau liquide, P_p/P_v la ratio de la pression partielle en vapeur d'eau sur la pression de vapeur saturante de l'eau. La différence de potentiel chimique volumique entre l'eau dans la feuille et dans l'air est énorme, pouvant mener à $\Psi_{\text{H}_2\text{O, gaz}} - \Psi_{\text{matrix}} = 100 \text{ MPa}$. En terme de pression hydrostatique, cela représente une hauteur de 10000 m. Les arbres peuvent en apparence amener l'eau bien plus haut que leur hauteur maximale observée via ce mécanisme.

2.2.3 Contraintes biologiques

Il ne faut pas oublier les contraintes biologiques qui vont de paire avec l'objectif d'amener de l'eau au sommet de l'arbre : créer des cellules aux parois assez solides, réparer les cas d'embolies, entretenir le réseau. Aujourd'hui, l'on a montré que les arbres peuvent supporter des pressions négatives de l'ordre de $13 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, au maximum, ce qui correspondrait à une hauteur d'arbre d'environ 130 m. La limite physique à la taille maximale des arbres est toujours un problème ouvert dont la solution n'est pas encore claire.

2.3 Amener la sève jusqu'aux racines : le mécanisme de Munch.

Pour amener la sève jusqu'aux racines, les plantes utilisent le mécanisme de Munch. L'eau est mise en mouvement grâce à des gradients de pression d'origine osmotique. Ce mécanisme proposé par Ernst Munch en 1930.

Les concentrations en sève élaborée (sucres) dans les parties productrice d'énergie, principalement les feuilles, est plus importante que dans les parties consommatrices (branches, tronc, racines). De ce fait une différence de pression osmotique importante née entre les feuilles et les racines, pour simplifier les racines. Cette différence de pression est à l'origine du flux de sève dans l'arbre.

POUR ALLER PLUS LOIN :

Jensen, K. H., Berg-Sørensen, K., Bruus, H., Holbrook, N. M., Liesche, J., Schulz, A., & Bohr, T. (2016). *Sap flow and sugar transport in plants*. **Reviews of modern physics**, 88(3), 035007.

3 Conclusion

Ce cours est une introduction à la biomécanique des plantes du point de vue ingénieur. En tant que bio-mécanicien, il faut bien avoir à l'esprit que selon que l'approche soit motivée par la biologie ou par l'ingénierie (biomimétisme) les questions posées et les manières d'y répondre sont différentes.

Il ne faut pas non plus oublier que les plantes sont des objets vivants qui évoluent dans un environnement changeant et dont les formes et les traits caractéristiques sont soumis à une optimisation globale. La nature n'est pas toujours optimale au sens où on l'entend habituellement, l'optimalité d'une forme peut être excellente par rapport à un critère (e.g. avoir des feuilles fines pour capturer la lumière) mais qui deviennent catastrophiques par rapport à un second paramètres (e.g. s'il y a du vent, les feuilles fines vont se casser plus facilement). La formule darwinienne "le mieux adapté survit" est généralement difficile à définir et à appliquer.