

Compte-rendu du séminaire :

Comment bouger sans muscle ?
ou la physique des plantes carnivores...

présenté par Yoel Forterre
du laboratoire IUSTI de Marseille

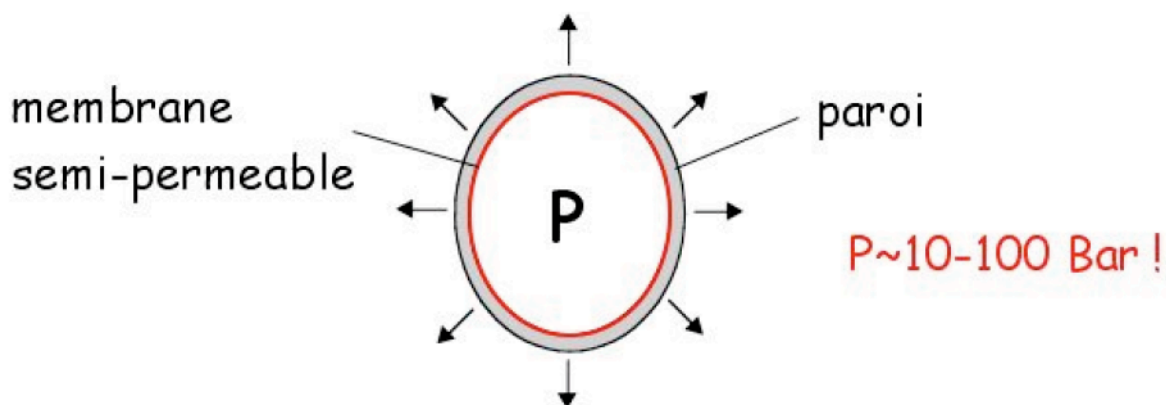
compte-rendu rédigé par :
Olivier Cochet et Arnaud Goussebaile

Un certain nombre de plantes sont capables de réaliser des mouvements rapides alors que celles-ci n'ont pas de muscle. Ces mouvements peuvent avoir différents buts comme la reproduction ou la défense, mais aussi la nourriture pour les plantes carnivores comme la Dionée. Le but de l'étude de ces mouvements est de comprendre par quels mécanismes physiques ces plantes sont capables de réaliser ces mouvements rapides sans muscle. Nous verrons d'abord comment les plantes peuvent réaliser de tels mouvements à l'aide de mouvement d'eau. Puis nous constaterons que certains mouvements comme celui de la Dionée sont trop rapides pour s'expliquer ainsi. Nous tenterons enfin de trouver un mécanisme physique dit de flambage élastique qui permette d'expliquer la rapidité du mouvement de la Dionée

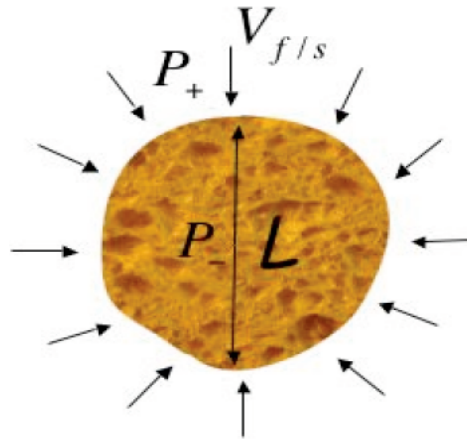
1) Mouvement d'eau

Une plante qui réalise des mouvements rapides le fait en réaction à un stimulus. Elle perçoit et transmet ce stimulus sans nerf par l'intermédiaire de cellules mécano-transductrices qui transforment le stimulus, signal mécanique, en un potentiel d'action, signal électrique. Ce mécanisme de perception-transmission rapide permet alors à la plante de répondre au stimulus par un mouvement rapide sans présence de muscle. Certains de ces mouvements rapides peuvent s'expliquer par des mouvements d'eau.

Par exemple la pression osmotique est un phénomène qui peut expliquer certains mouvements rapides des plantes. En effet, lorsque l'on a une paroi dont la membrane est perméable à l'eau mais pas aux solutés comme ci-dessous, la différence de concentration en solutés entre les deux côtés de la membrane engendre une différence de pression P dit osmotique entre les deux côtés. Cette différence de pression qui est de l'ordre de 10 à 100 bars est proportionnelle à la différence de concentration en solutés pour les faibles concentrations. Par conséquent, les variations des quantités d'eau et des concentrations en solutés vont engendrer des mouvements qui seront rapides grâce aux variations de pression.



Mais la rapidité des mouvements dus à des mouvements d'eau va être limitée par des contraintes physiques qui peuvent s'exprimer à travers le temps poroélastique et le temps inertiel. Pour trouver les contraintes physiques sur de tels mouvements, on prend par analogie le mouvement d'une éponge comprimée dans de l'eau.



En raison de la différence de pression $P=P_+-P_-$, l'eau va rentrer dans l'éponge à une vitesse $V_{f/s}$. Par conséquent, en raison de la conservation de la masse, l'éponge de taille caractéristique L va voir son rayon $u(t,r)$ augmenter.

Lorsque l'inertie est négligeable, on peut écrire l'équilibre des forces entre la force d'élasticité σ_{el} et la force de pression P :

$$\sigma_{el} \sim P$$

La conservation de la masse nous donne :

$$V_{f/s} \sim -\frac{\partial u}{\partial t}$$

De plus, par les lois de Hooke et de Darcy, on a :

$$\sigma_{el} \sim E \frac{\partial u}{\partial r}$$

$$V_{f/s} \sim -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial r}$$

Où E est le module d'Young de l'éponge, η est la viscosité dynamique de l'eau et k est la perméabilité de l'éponge à l'eau.

En combinant ces équations, on obtient une équation sur P dont on déduit le temps caractéristique suivant dit poroélastique de ce type de mouvement :

$$\tau_p = \frac{\eta L^2}{kE}$$

Lorsque l'inertie ne devient plus négligeable et l'emporte sur la pression, on remplace dans l'équilibre des forces la pression par l'inertie et on en déduit avec les autres équations

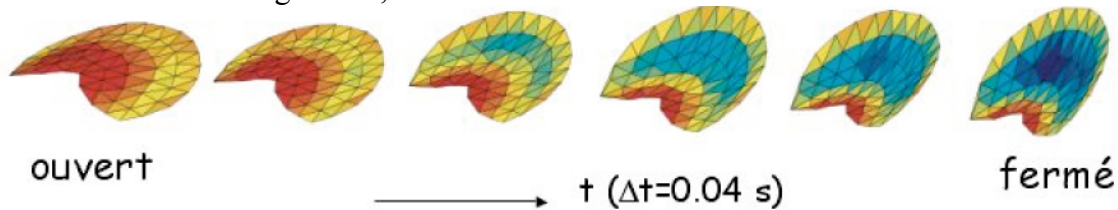
qui restent valables une équation sur u qui nous donne le temps caractéristique suivant dit inertiel de ce type de mouvement limite où ρ est la densité de l'eau:

$$\tau_i \sim L \sqrt{\frac{\rho}{E}}$$

On constate expérimentalement avec l'exemple de la plante carnivore Dionée que certains mouvements rapides de plantes sont trop rapides pour être expliqués par un phénomène de mouvement d'eau en comparant le temps réel de réaction aux temps poroélastique et inertiel. Par conséquent, nous allons tenter de comprendre le mécanisme de mouvement rapide de la Dionée pour comprendre un des autres mécanismes de mouvements rapides des plantes.

2) Flambage élastique

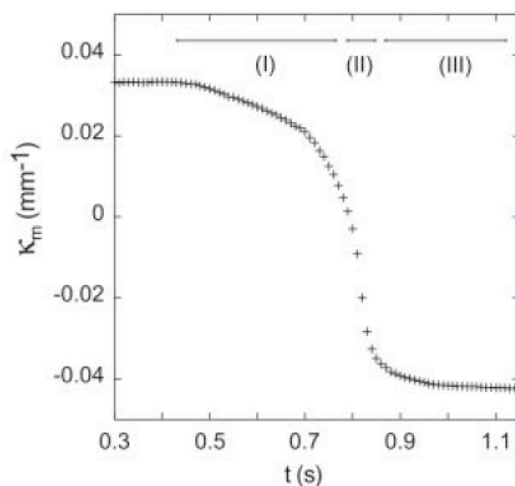
Lors de son mouvement de fermeture, la feuille de la Dionée ressemble à l'une de ces puces pour enfant que l'on fait sauter. L'idée du groupe a donc été d'étudier la géométrie de la feuille lors de son mouvement. Pour cela, ils utilisent un procédé optique avec deux miroirs et une méthode de triangulation, ils obtiennent ainsi la forme de la feuille à tout instant.



On étudie alors l'évolution de la courbure de la feuille au cours du temps. On a deux manières de calculer la courbure: la courbure moyenne qui est la simple moyenne arithmétique des deux courbures principales de la feuille et la courbure de Gauss qui est leur produit.

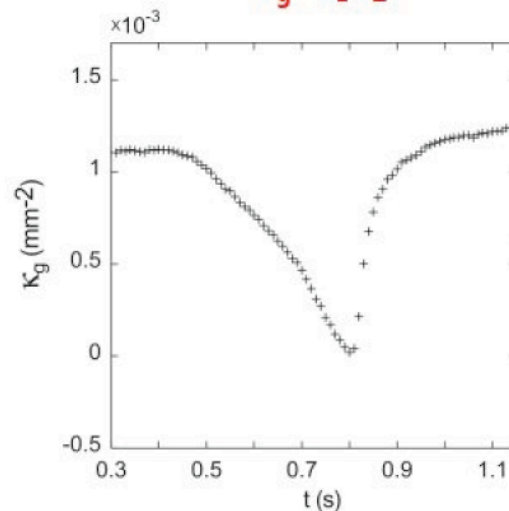
Courbure moyenne :

$$\kappa_m = (\kappa_1 + \kappa_2) / 2$$



Courbure de Gauss :

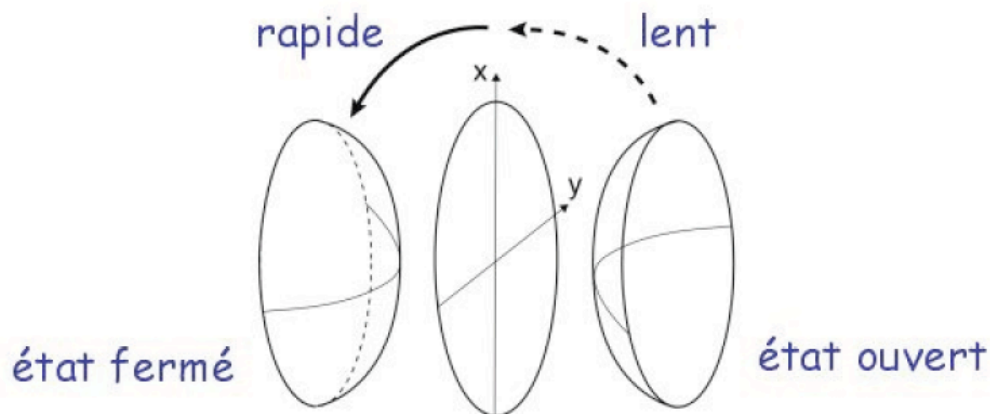
$$\kappa_g = \kappa_1 \kappa_2$$



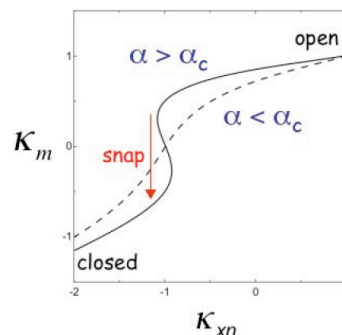
La première montre un mouvement décomposé en trois phases avec changement de courbure moyenne amorti très rapidement et sans oscillation. La deuxième est intéressante car elle montre un changement rapide de la courbure de Gauss, ce qui témoigne d'une grande variation d'énergie d'étirement de la feuille. On sent donc un stockage et une libération d'énergie d'étirement par la feuille ainsi qu'une probable instabilité élastique.

On réalise ensuite des mesures de déformation des surfaces internes et externes de la feuille, les résultats de ces mesures montrent que la surface interne n'est quasiment pas modifiée par le mouvement alors que la surface externe subit un allongement fort et anisotrope.

On ne s'intéresse plus qu'alors à cette surface externe. On la dissèque après fermeture en découpant des bandes soit dans l'axe de la tige soit dans l'axe orthogonal. On remarque qu'en découpant dans le sens de la tige, la feuille rebrique sur elle-même et l'autre axe ne fait que suivre le mouvement, il y a donc, au cours de la fermeture, changement de la courbure naturelle de la feuille et ce selon un axe seulement. On peut donc dire que la plante a un contrôle actif de ce paramètre. Ce résultat explique par exemple le changement rapide de la courbure de Gauss et conforte l'idée d'une instabilité venant de la barrière d'énergie élastique d'étirement. On peut comprendre également les différentes phases du mouvement. D'abord, la plante ferme la feuille, ce qui est lent car cela demande un apport d'énergie, une fois arrivé à un niveau limite, la feuille se referme très rapidement, exactement comme le font ces fameuses puces.



On élabore un modèle théorique de coque élastique avec un paramètre contrôlé par la plante. On arrive alors à un facteur mesurant efficacement la courbure des feuilles et que l'on note α , celui-ci est le rapport de l'énergie d'étirement sur l'énergie de courbure. La courbe donnant α en fonction des paramètres est typique d'une instabilité avec possibilité de « snap ».



On étudie alors la vitesse de fermeture de la feuille en fonction du paramètre α . On observe d'abord que plus la courbure est forte plus la vitesse maximale de fermeture est

grande. Cela dit, le temps total de fermeture (grandeur plus intéressante biologiquement) est optimisé par des courbures moyennes et non par des feuilles très courbées. En effet, pour celles-ci, la fermeture est très rapide mais la première phase du mouvement est, elle, beaucoup plus longue.

Conclusion

On voit que les mouvements sans muscles sont fréquents chez les plantes et peuvent avoir plusieurs explications. Des variations de pression osmotique pour des mouvements rapides mais pas trop ou des instabilités élastiques pour des mouvements tels que ceux de la Dionée. Cependant, même si mécaniquement la feuille se comporte comme une coque élastique, ce qui offre une alternative au mouvement musculaire, il existe des spécificités liées au vivant. En particulier, le contrôle actif de la courbure selon un axe par la plante pose problème. Cette étude est donc une porte ouverte à l'étude des mouvements actifs chez les plantes.