

Couplage poroélastique dans des branches naturelles et artificielles : lien avec la mécano-perception des plantes

JF. LOUF^a, G. GUÉNA^a, É. BADEL^b et Y. FORTERRE^a

a. Aix-Marseille Université, IUSTI-CNRS UMR 7343, 13453 Marseille cedex 13, France,
jean-francois.louf@univ-amu.fr, geoffroy.guena@univ-amu.fr, yoel.forterre@univ-amu.fr

b. UMR 547 PIAF, Clermont Université, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand F-63000,
eric.badel@clermont.inra.fr

Résumé : (16 gras)

Dans la nature les plantes sont soumises à des sollicitations mécaniques externes qui ont un impact important sur leur croissance. De façon remarquable, cette réponse en croissance n'est pas seulement locale mais aussi non-locale, suggérant un transport de l'information. Récemment, il a été suggéré que ce signal pourrait être une onde de pression générée par la flexion mécanique des branches. Afin de tester cette idée, nous avons élaboré une branche artificielle en élastomère de silicone (PDMS). De façon surprenante, la flexion d'une telle branche génère une surpression dont l'amplitude varie quadratiquement avec la déformation imposée. Pour comprendre l'origine de cette réponse non-linéaire, nous proposons un modèle énergétique simple. Des expériences sur des branches naturelles suggèrent la robustesse de ce mécanisme.

Abstract : (16 gras)

In natural conditions plants are subjected to mechanical deformations that affect their growth. The bending of a stem leads to an immediate stop of growth far from the stimulated area, suggesting the existence of a long-distance signal. Recently, it has been suggested that this signal could be from a purely hydro-mechanical coupling. To test this hypothesis our approach has been to study an artificial branch made with elastomer (PDMS). Interestingly, we saw that bending generates an overpressure that varies as the square of the bending deformation. To understand the origin of this non-linear response we suggest a simple elastic energy model. Similar experiments made on natural tree branches suggest that it is the same mechanism.

Mots clefs : Poroélasticité, biomimétique, mécano-perception

1 Introduction

En conditions naturelles, les plantes sont sans cesse soumises à des sollicitations mécaniques externes, comme le vent ou la pluie, qui affectent et modifient leur croissance [1, 2]. Ainsi, à l'échelle de l'arbre,

une flexion engendre un arrêt de croissance loin de la zone sollicitée, ce qui suggère l'existence d'un signal pouvant se propager à travers la plante [3]. La nature et le mécanisme de ce signal ne sont pas bien compris et différentes hypothèses ont été émises. L'une d'entre elles suggère que cette surpression serait d'origine purement mécanique [4, 5] : une onde hydraulique serait générée en réponse à une déformation locale et se propagerait à travers le système vasculaire de la plante. Cette hypothèse a été récemment testée par des mesures de pression lors de la flexion de branches et tiges de jeunes arbres [6]. Ces mesures ont montré l'existence d'une surpression engendrée par une flexion qui se propage à travers tout le système vasculaire de la plante.

Cette observation soulève des questions. Une branche peut être vue comme un milieu élastique déformable gorgé d'eau. Il est donc naturel de penser qu'une déformation de celui-ci va engendrer des mouvements d'eau. Cependant, lorsque l'on applique une courbure à une poutre, une partie de celle-ci est en compression, l'autre partie est en extension, mais la théorie linéaire des poutres prédit que son volume total ne change pas. L'observation d'une surpression n'est donc pas triviale. Afin de mieux comprendre ce phénomène, notre approche a été de reproduire cette expérience sur une branche artificielle.

2 Expériences sur branches artificielles

2.1 Ingrédients minimaux d'une branche

Une branche peut être vue comme une poutre cylindrique percée de micro canaux longitudinaux gorgés d'eau. Notre approche a été de faire le moulage du négatif des poutres à l'aide d'un élastomère de silicone (PDMS) et d'un tube contenant des tiges métalliques (Figure 1). Cet élastomère est mou (Module d'Young $E \sim 2$ MPa), transparent et isotrope. La taille des canaux est de 500 μm . Ils sont ensuite remplis d'huile silicone de viscosité $\eta \simeq 1$ Pa.s.

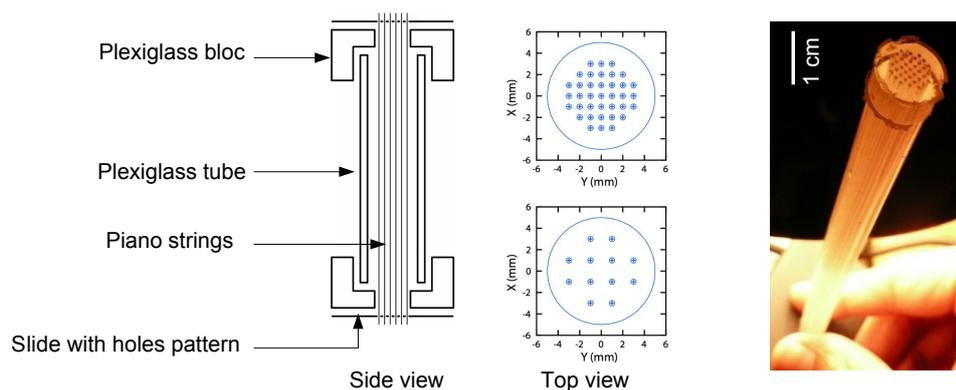


FIGURE 1 – Moule utilisé pour fabriquer des branches artificielles et photo du résultat.

Montage expérimental Dans toutes les expériences, le système est à volume de fluide constant, isolé de l'extérieur. Une extrémité de la poutre est connectée à un capteur de pression tandis qu'un moment est appliqué à son extrémité libre en utilisant un moteur linéaire (voir figure 2.A). Une photo nous permet de mesurer la courbure moyenne appliquée : $\bar{C} = \Delta\theta/L$ où L est la longueur de la poutre et $\Delta\theta$ l'angle entre les deux extrémités de la poutre. La déformation ε est définie comme étant la déformation longitudinale maximale : $\varepsilon = \bar{C}R$ où R est le rayon de la poutre.

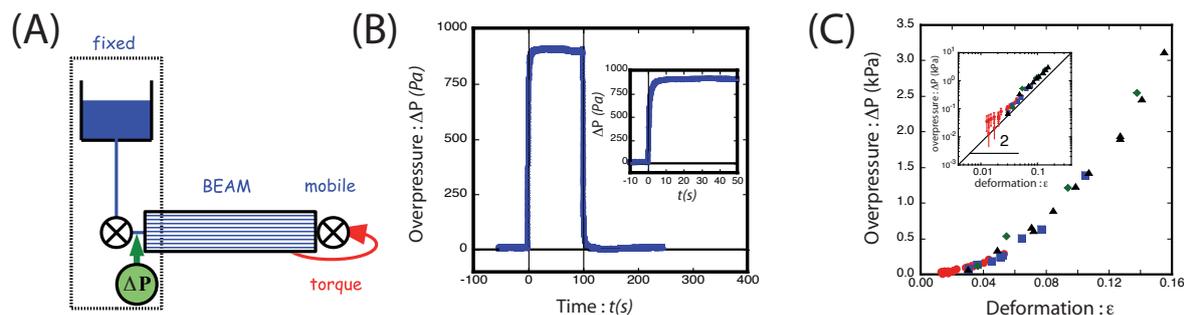


FIGURE 2 – (A) Montage expérimental. (B) Un signal typique. La poutre est fléchie à $t = 0$ s ce qui génère une surpression stationnaire, qui revient à 0, lorsque la poutre retourne à sa position initiale à $t = 100$ s. (C) Relation non linéaire entre la surpression mesurée et la déformation appliquée.

2.2 Signal de pression dans des poutres fléchies

Un signal de pression typique obtenu lors d'une flexion est montré sur la figure 2.B. On observe qu'une flexion génère une surpression stationnaire qui revient à zéro lorsque la poutre est remise dans son état initial. De plus, l'amplitude de cette surpression varie comme le carré de la déformation appliquée (Figure 2.C).

2.3 Modèle énergétique simple

Contrairement à la prédiction de la théorie linéaire des poutres, la surpression observée montre une diminution du volume des canaux. Celle-ci peut s'expliquer de la façon suivante. Pour une courbure donnée, les déformations sont maximales à l'extérieur et augmentent avec son rayon. Ainsi, l'énergie élastique de flexion d'une poutre est d'autant plus grande que son rayon est important. Cette énergie est réduite si les parties les plus éloignées se rapprochent de son centre. Dans le cas d'une poutre poreuse, cette compression transverse, qui varie comme le carré de la déformation longitudinale, est à l'origine d'un écrasement qui va diminuer le volume total des canaux [7]. Par définition, si ceux-ci sont remplis d'un fluide incompressible cette variation de volume génère une surpression $\Delta P = B\Delta V/V$ où V est le volume des canaux et B l'inverse de leur compressibilité. Le calcul complet donne :

$$\Delta P \approx \frac{1}{2}B\varepsilon^2 \quad (1)$$

3 Comparaison branches naturelles et artificielles

Des expériences similaires ont été faites sur des branches d'arbres de différentes espèces afin de tester la validité de notre modèle. Bien que la structure d'une branche soit beaucoup plus complexe, la surpression mesurée varie encore quadratiquement avec la déformation longitudinale appliquée comme dans le cas des branches artificielles (Figure 3.A). L'amplitude typique de cette surpression est plus importante. Cela s'explique bien si l'on considère que le bois est plus rigide toutefois notre modèle a permis d'identifier le paramètre mécanique pertinent : la compressibilité des canaux. Ce paramètre a été mesuré pour chaque échantillon et on voit sur la figure 3.B qu'une fois les signaux normalisés par celui-ci les points se placent sur une tendance unique rassemblant les branches artificielles et naturelles, suggérant l'universalité du mécanisme mis en jeu.

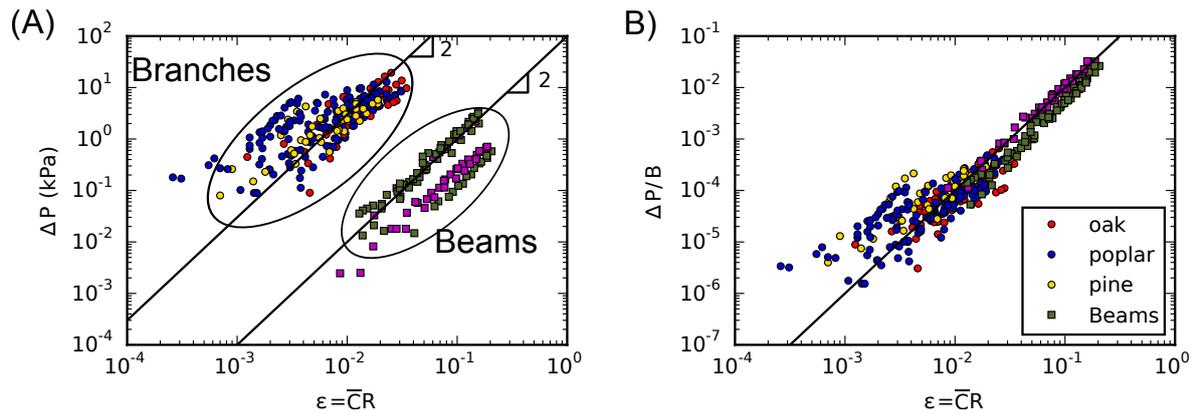


FIGURE 3 – (A) Amplitude de la surpression mesurée en fonction de la déformation longitudinale appliquée pour les branches artificielles et naturelles. (B) Surpression normalisée par l'inverse de la compressibilité.

Références

- [1] J. Braam, In touch : plant responses to mechanical stimuli, *New Phytologist* 165, 373-389, 2004.
- [2] F.W Telewski, A unified hypothesis of mechanoperception in plants, *American Journal of Botany* 93, 1466-1476, 2006.
- [3] C. Coutant and B. Moulia, Biomechanical study of the effect of a controlled bending on tomato stem elongation : local strain sensing and spatial integration of the signal, *J. Exp. Bot.* 51, 1825-1842, 2000.
- [4] M. Malone, Hydraulic signals, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 341, 33-39, 1994.
- [5] JL. Julien, PhD thesis, 1993.
- [6] R. Lopez, E. Badel, S. Pereaudeau, F. Beaujard, H. Cochard, B. Moulia, Bending strains generates high hydraulic pulses in trees, *J. Exp. Bot.* in press.
- [7] L.G. Brazier, On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections, *Proc. R. Soc. Lond. A* 116, 104-114, 1927.