

L'arbre dans le vent

Par Sébastien Drouineau

sur la base des contributions et commentaires de Thierry Fourcaud (CIRAD), François Houllier (INRA/CIRAD), Jean-Philippe Schütz (École Polytechnique de Zürich - Suisse), Alexia Stokes (INRA) ; Michel Vallance (ONF)

GIP ECOFOR
19, avenue du Maine, 75732 Paris cedex 15
drouineau@engref.fr

Les forces en présence

Le vent est un phénomène pulsatoire dont l'action s'opère principalement sur le houppier, entraînant un comportement oscillatoire de l'arbre. Le mouvement est transmis par la tige au complexe sol + racine. La réponse de l'arbre au vent fait intervenir :

- la force du vent, qui porte essentiellement sur le houppier, et dont on résume l'action au niveau d'un point d'application appelé centre de poussée ;
- le poids de l'arbre, dont le moment est non nul dès que l'axe point d'ancrage - centre de gravité n'est plus vertical, et qui devient de plus en plus important quand l'arbre est désaxé¹ ;
- l'ancrage de l'arbre au sol (lois de comportement mécanique des racines et propriétés physiques du sol), qui est fortement lié à la nature du complexe racines + sol et s'oppose à l'arrachement de l'arbre ;
- les lois de comportement mécanique des parties aériennes de l'arbre.

La conjugaison de ces actions et réactions peut conduire soit à une simple déformation de l'arbre sans basculement ni rupture, soit à son basculement, soit à sa rupture à différentes hauteurs possibles.

La réponse de l'arbre au vent : une mise en mouvement de type oscillatoire

Première approche : un arbre isolé soumis à un flux stationnaire

La force exercée par le vent sur l'arbre dépend de sa « prise au vent ». En première approche et en résumant l'action du vent à celle d'un écoulement d'air stationnaire, celui-ci développe une force dite « force de traînée » directement proportionnelle à la surface de houppier interceptée².

Cette force met également en jeu la « qualité » du houppier via le coefficient de traînée. Ce paramètre résume la capacité du houppier à intercepter le vent et est d'autant plus élevé que le houppier est dense. C'est ainsi que ce paramètre varie en fonction de l'essence, mais aussi de la feuillaison. Les feuillus, défeuillés en hiver, sont ainsi moins soumis à l'action du vent. De même, plusieurs gestionnaires ont noté la bonne tenue des arbres morts sur pied pendant les tempêtes de fin 1999 !

On résume l'action du vent au niveau du centre de poussée, dont la hauteur correspond approximativement à celle du centre du volume de révolution de la projection dans un plan vertical du

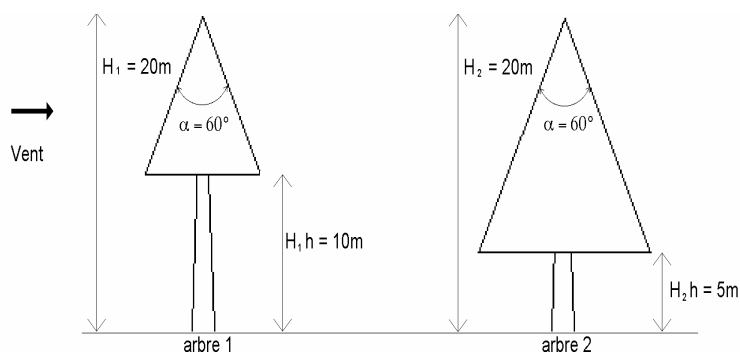
¹ Bouchon (1987) relate des essais en traction sur des épicéas de Sitka de 20 m de haut. Au point de basculement, l'arbre est incliné de 22° par rapport à la verticale et le poids des parties aériennes contribue alors pour 30% à l'arrachement.

² $F = da \cdot Cd \cdot U^2 \cdot S$; avec da = densité de l'air, Cd = coefficient de traînée, U = vitesse du vent, S = surface interceptée.

houppier (Fournier, 1989). La hauteur de ce point particulier caractérise le « bras de levier » dont dispose le vent. La force du vent est donc d'autant plus « efficace » que ce centre de poussée est déporté vers le haut ; en termes physiques, c'est en effet le moment de la force de traînée (égal ici au produit de la force de traînée et de la hauteur du centre de poussée), qui détermine le basculement ou non de l'arbre (moment de flexion au collet $M_0 = F \cdot h$). L'action du vent est donc fonction de la taille du houppier (valeur de la force de traînée), et de sa forme (position du centre de poussée). Pour les arbres à houppier important, la valeur élevée de la force de traînée liée à la grande surface interceptée est tempérée par la présence de branches basses, qui abaissent le centre de poussée.

Application numérique

Deux arbres dont les houppiers sont assimilés à des cônes (type résineux), de mêmes coefficients de traînée, soumis à un vent constant de même vitesse, et présentant les caractéristiques dendrométriques décrites sur la figure ci-contre, ont des centres de poussée C_{p1} et C_{p2} situés respectivement à 13,3 et 10 m du sol. Malgré un centre de poussée plus bas, le moment développé par la force de traînée (*cf* formule ci-dessus) est plus fort pour l'arbre 2, ce que l'on comprend aisément étant donné que passer de l'arbre 1 à l'arbre 2 revient à « rajouter de la voile » (fût-ce par le bas...).



Malgré un centre de poussée plus bas, le moment développé par la force de traînée (*cf* formule ci-dessus) est plus fort pour l'arbre 2, ce que l'on comprend aisément étant donné que passer de l'arbre 1 à l'arbre 2 revient à « rajouter de la voile » (fût-ce par le bas...).

$$M_2 / M_1 = 1,69$$

M_2 et M_1 désignent les normes des moments de forces de traînée s'appliquant respectivement à l'arbre 2 et à l'arbre 1.

Ce ratio reste néanmoins moins élevé que le ratio des surfaces interceptées, car on a « rajouté de la voile » par le bas :

$$S_2 / S_1 = 2,25$$

S_2 et S_1 désignent les surfaces interceptées par l'arbre 2 et l'arbre 1.

Prise en compte du caractère non stationnaire du vent

Ce type d'approche néglige cependant une des caractéristiques essentielles du vent : son caractère pulsatoire. Pour un peuplement de pins sylvestres, Oliver et Mayhead (1974) observent ainsi que les vitesses de vent mesurées dans le cas d'une tempête entraînant des chablis sont inférieures aux prédictions issues des expériences de traction d'arbres et attribuent cet apparent paradoxe aux phénomènes de résonance pouvant exister entre le vent et l'arbre. Cette dernière hypothèse est par ailleurs contestée en raison de coefficients d'amortissements généralement très élevés (*cf*, par exemple, Wood, 1995). Fournier (1989) suggère que la prise en compte de phénomènes dynamiques peut se traduire par des déformées plusieurs fois supérieures à celles qui sont prédites par un raisonnement purement statique. Ceux-ci seraient prépondérants pour comprendre l'effet des tempêtes.

L'oscillation de l'arbre dans son ensemble (qui correspond au mode oscillatoire fondamental) a une période de l'ordre de quelques secondes³. Cette oscillation peut être correctement approchée par des méthodes utilisant une description simple de l'arbre ne prenant pas en compte la flexibilité des

³ La valeur moyenne des fréquences fondamentales mesurées par Milne (1990) pour 26 épicéas de Sitka de 23 ans est de 0,35 Hz (soit une oscillation toutes les trois secondes environ).

branches (Milne, 1991). Cependant, chacun des axes de l'arbre (tronc et branches) possède ses propres fréquences propres (une fréquence fondamentale et plusieurs harmoniques) liées à la structure et à la répartition des charges que ces axes supportent. Cela multiplie les possibilités d'interactions au sein même de la structure, qui peuvent être étudiées de façon théorique par la modélisation.

Une telle approche a été menée par Rogier *et al.* (1992) pour des pins maritimes et des hévéas « théoriques » dont la forme (issus pour l'hévéa du modèle de croissance AMAP) et les propriétés mécaniques ont été traduites sous forme de code de calcul (MODULEF). A l'instar de Milne (1991), Rogier *et al.* montrent que le mode fondamental de la structure d'ensemble est correctement décrit en considérant les branches comme parfaitement rigides car celles-ci ne vibrent quasiment pas pour ces fréquences particulières. Il n'y a alors pas de risques de résonance et de torsion entre les différents axes de l'arbre et, donc, de casse imputable à de tels phénomènes. En revanche, les premiers harmoniques du tronc et les fréquences fondamentales de certaines branches principales sont très proches. Les modes vibratoires étant nombreux dans ces structures complexes, nombreuses sont également les fréquences « à risques » pour lesquels les phénomènes de torsion et de résonance cités plus haut sont susceptibles de se produire, générant des bris notamment au niveau des points d'insertions des branches et, plus particulièrement, pour les arbres fortement réitérés.

Certains auteurs ont montré, par ailleurs, qu'outre les contraintes mécaniques générées par ces oscillations de forte amplitude sur l'arbre, celles-ci peuvent être à l'origine d'une modification des propriétés physiques des sols notamment argileux et humides, qui peuvent passer à l'état plastique, voire liquide. Ce phénomène permet de comprendre la prépondérance des déchaussements sur sol humide (*cf* également la contribution de Schütz).

Amortissement des oscillations

Les travaux sur l'amortissement des oscillations des arbres ont été menés de manière tant théorique que pratique. Pour étudier la réponse dynamique de l'arbre à une sollicitation, Milne (1991) a mesuré, puis mis en équation, le déplacement horizontal du point de la tige situé à 6 m du sol pour des épicéas de Sitka (peuplement de 23 ans non éclairci planté à 3 800 arbres / ha et de hauteur dominante = 14 m).

Ces mesures sont effectuées selon trois modalités successives :

- l'arbre possède toutes ses branches et les arbres voisins sont maintenus ;
- l'arbre possède toutes ses branches et les arbres voisins ont été coupés ;
- les branches de l'arbre et les arbres voisins ont été coupés.

L'amortissement est caractérisé dans l'équation du mouvement⁴ par le coefficient d'amortissement. Schématiquement, plus ce terme est élevé, plus l'oscillation de l'arbre s'estompe rapidement. Le coefficient d'amortissement est évalué dans les trois cas à partir du mouvement observé, et l'on peut en déduire, en situation normale (présence des branches et de tous les voisins de l'arbre), la part de l'amortissement due à la tige seule, à la présence des branches et au peuplement. Les contributions relatives à l'amortissement sont respectivement de 10, 40 et 50%⁵, ce qui montre, certes, l'importance des voisins mais aussi des branches du houppier dans l'amortissement des oscillations et *a contrario* la faible contribution à l'amortissement de la tige.

⁴ Il s'agit d'une équation différentielle du type : $M.(d^2X/dt^2) + C.(dX/dt) + K.X = 0$

⁵ En fait, Milne s'intéresse au ratio d'amortissement 'r', défini tel que $C = r.C_c$. Sous cette écriture, C_c est une constante qui correspond à la valeur critique de C telle que :

- si $C = C_c$, le mouvement cesse sans oscillations préalables ;
- si $C < C_c$, l'arbre se balance avant de se stabiliser.

Dimensions relatives des compartiments de l'arbre

Les différents compartiments de l'arbre (complexe racines + sol, tige et houppier) doivent bien évidemment être examinés « en proportion », les uns par rapport aux autres. Il se pose d'évidents problèmes de stabilité dans le cas d'un appareil aérien surdimensionné par rapport à l'appareil racinaire, le contrepoids du complexe racine + sol étant beaucoup plus réduit. La stabilité des arbres doit alors être examinée en particulier avec la station, le système racinaire pouvant être contraint dans sa croissance sans que cela remette fondamentalement en question la croissance de l'appareil aérien (ex : hêtres sur plateau calcaires). La nature du système racinaire est aussi liée à l'espèce. Dans des conditions de libre croissance, les systèmes racinaires les plus efficaces en termes de stabilité sont les systèmes « en cœur », suivi des systèmes pivotants, puis des systèmes traçants, et cela est lié en particulier au développement des racines fines, qui sont en grande partie responsables de la cohérence entre le système racinaire et le sol.

Enfin, on a vu que les arbres à houppier important sont soumis à une action plus forte du vent dans le cas d'un flux stationnaire. Cependant, les propriétés de résistance de l'arbre ne sont pas non plus indépendantes de la taille du houppier. En effet, le développement de houppiers importants est généralement lié à une faible concurrence et est alors associé à une croissance plus rapide en diamètre, relativement à la hauteur (les élancements des arbres sont inférieurs), qui se traduit par de meilleures propriétés de résistance de l'arbre à la cassure et même à l'arrachement (développement du système racinaire). Ainsi, Stokes (1999) montre, pour des pins maritimes (essentiellement soumis aux chablis), que le moment d'ancrage est proportionnel au cube du diamètre de la tige à 1,30 m.

Propriétés mécaniques des arbres et mécanismes biologiques d'adaptations

La croissance longitudinale et radiale des arbres est un phénomène essentiellement discontinu, y compris en zone intertropicale où la saisonnalité est peu marquée, et les conditions extérieures qui diffèrent d'une année sur l'autre peuvent se traduire par des croissances annuelles très différentes (largeur de cerne et ratio bois initial / bois final, par exemple). D'autres facteurs exogènes peuvent être à l'origine de faiblesses structurelles, parfois localisées (ex : action d'un agent pathogène). Enfin, l'arbre est capable d'adaptations au cours de sa croissance. Les tropismes ont été particulièrement étudiés, l'arbre peut ainsi réorienter en permanence sa croissance grâce à la mise en place de bois de réaction (compression chez les résineux, tension chez les feuillus) de manière dissymétrique par rapport à l'axe de la tige⁶. Les déformations résiduelles de maturation au niveau des différents organes des arbres sont un bon indicateur de la mise en place de bois de réaction et leur mesure sur des pins maritimes (Stokes, 1999) montre qu'elles sont très abondantes, témoignant de constants rééquilibrages au cours de l'histoire de l'arbre.

Au bilan, l'arbre apparaît comme une structure complexe hétérogène, présentant des zones de faiblesse où vont se produire de façon privilégiée les ruptures.

Des essais en traction sur plusieurs essences (Stokes *et al.*, 2000) ont montré qu'il était possible d'identifier de façon assez sûre les points de rupture des arbres (tige, collet ou système racinaire). La rupture qui finit par apparaître suite à une augmentation progressive de la traction se produit au niveau d'un point qui montre pour des tractions très faibles des micro-déformations (mesurées à l'aide de jauges d'extensométrie) d'emblée beaucoup plus marquées que pour les autres zones de l'arbre.

⁶ Ces mécanismes bien connus sont responsables du redressement des arbres, mais induisent des contraintes internes, responsables par exemple de l'éclatement des tiges lorsque ces contraintes sont libérées de façon violente à la faveur du bûcheronnage.

Enfin, les gestionnaires évoquent souvent l'adaptation des arbres au vent pour expliquer, par exemple, la plus grande résistance des arbres de lisière. Cette connaissance empirique est relayée par un certain nombre de travaux scientifiques mettant en évidence des formes de croissance adaptative au vent. En France, c'est surtout le pin maritime qui a fait l'objet de telles études. Pour le système aérien, on a ainsi constaté une plus forte croissance en diamètre dans le jeune âge pour des plants directement exposés à un flux d'air régulier⁷. Le système racinaire fait apparaître des dissymétries entre les racines situées au vent et sous le vent (racines épaisses de structure sous le vent, racines plus ramifiées et plus fines côté au vent), et entre les faces des racines (par exemple, cernes plus larges sur la face supérieure des racines en compression s'opposant à la flexion). Les mécanismes biologiques qui permettent d'aboutir à la mise en place de ces tissus « modifiés » ne sont pas connus pour le moment. Par ailleurs, ces phénomènes de croissance adaptative valent pour des vents " normaux " sollicitant assez régulièrement les arbres. Leur rôle dans le cas de phénomènes exceptionnels est en revanche beaucoup moins clair.

Discussion : prise en compte du peuplement et classement des essences

L'approche conduite jusqu'à présent a consisté à « extraire » l'arbre de son peuplement et n'a que suggéré l'effet de la station sur la stabilité des arbres (sur l'architecture racinaire en particulier). Il convient néanmoins de garder à l'esprit le fait que la croissance des arbres, et la mise en place des propriétés de stabilité qui en résulte, sont fortement liées aux facteurs exogènes que sont la station et la sylviculture ; et que le peuplement, à un instant donné, possède des propriétés particulières de résistance au vent lié à sa structure, et influence directement les flux d'air. Pour ces raisons, il est difficile, voire un peu artificiel, de mener une analyse de la stabilité de l'arbre en se déconnectant du contexte peuplement / station actuel et passé.

Oliver et Mayhead (1974) ont effectué des mesures de vitesses de vent à différentes hauteurs dans et au-dessus d'un peuplement de pins sylvestres au cours d'une tempête. Ils montrent ainsi, via une courbe mettant en relation hauteur et vitesse du vent, un fort ralentissement du vent à l'intérieur du peuplement (sa vitesse réaugmente rapidement au-dessus de la canopée). La capacité du houppier à intercepter le vent ne dépend donc pas que de sa surface et de sa forme (position du centre de poussée), mais aussi de sa position par rapport à la canopée. Ainsi, on a observé pour des peuplements aussi bien irréguliers que réguliers que ce sont souvent les arbres émergeant qui ont subi des dégâts en priorité suite aux tempêtes de 1999 (« les têtes sont tombées »). Les lisières influencent également les flux d'air et peuvent jouer le rôle de masques en arrière desquels naissent des turbulences dont l'effet est souvent dévastateur.

Le peuplement a également un rôle dans l'amortissement des oscillations, du fait des frottements entre les couronnes. Dans l'expérience de Milne décrite plus haut, cet « effet bloc » contribuait pour 50% à l'amortissement. En même temps la concurrence influence la croissance des arbres dans le sens d'une moindre stabilité individuelle. Enfin, le pendant de l'« effet bloc » est l'effet « château de cartes » dont les conséquences plus ou moins désastreuses conduisent à s'interroger sur le bien-fondé d'une stratégie de stabilisation des peuplements exclusivement fondée sur l'« effet bloc »⁸.

⁷ Cette observation est issue d'essais en soufflerie, dans un dispositif où les plants sont disposés en couronne autour d'un ventilateur.

⁸ Le fait même de parler de " château de cartes " laisse supposer que la chute d'un arbre sur son voisin provoque la chute du voisin et ainsi de suite. Il n'est pas tout à fait certain que les chablis généralisés s'expliquent entièrement par cet effet de domino, du moins pour les résineux. Spontanément, les arbres ont en effet tendance à tomber les uns entre les autres, comme c'est le cas lors des opérations de bûcheronnage. Des vidéos amateurs en Suisse pendant Lothar montrent des chutes d'arbres généralisées exactement en même temps, comme si le peuplement « implorait d'un seul coup », et suggèrent que les arbres du peuplement atteignent ou se rapprochent en même temps d'un « seuil de rupture » (Schütz, com. pers.)...

La prise en compte du peuplement est examinée plus avant dans d'autres annexes (notamment Bergès et Schütz).

Par ailleurs, chaque essence a sa propre « réponse » à un contexte sylvicole et stationnel donné, qui se traduit par une stabilité plus ou moins bonne. Par exemple, le douglas possède une bonne résistance à l'arrachement sur sol profond et correctement drainé, liée à son système racinaire « en cœur ». En revanche, très sensible à l'humidité, il réagit à un engorgement même peu marqué et temporaire du sol en adoptant un système racinaire traçant et devient alors particulièrement sensible au chablis. Dès lors, il est difficile de comparer les essences entre elles dans l'absolu, en dehors de considérations objectives sur la nature du système racinaire en conditions optimales ou sur la résistance des bois qui ne permettent pas de conclure sur la stabilité. Une telle comparaison doit se limiter à un contexte sylvicole et stationnel donné et a pu être tentée au Royaume-Uni pour les peuplements résineux de production, du fait d'une certaine homogénéité dans les sylvicultures. Ces travaux ont débouché sur l'élaboration d'un logiciel *Forest Gale*, donnant les vitesses de vent provoquant des dégâts pour différentes essences en fonction de critères de station et de peuplement définis au départ (Vallance, comm. pers.).

Tableau I. Résistances comparées des essences résineuses aux vents de tempête
vitesse critique pour volis (dernière colonne) et chablis suivant le type de sol en m/s
comparaison effectuée pour $H_0 = 20\text{m}$, $D_g = 0,24$ et Densité = 1 000 tiges/ha

SOL : - avec drainage : + - sans drainage : -	SQUELET.		GLEYS		CALC		BRUN		PODZOL		BRIS indép. du sol
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	
ESSENCE											
Épicéa de Sitka	24	21	24	21	28	25	28	25	28	25	26
Épicéa commun	24	21	24	21	28	25	28	25	28	25	27
Mélèze d'Europe	26	23	26	23	27	24	27	24	27	24	28
Mélèze hybride	26	23	26	23			27	23	27	23	24
Mélèze du Japon	26	23	26	23			27	23	27	23	25
Pin sylvestre	23	20	23	20			24	21	24	21	26
Pin Laricio	24	21	24	21			25	22	25	22	25
Sapin Nobilis	27	24	27	24	30	26	30	26	30	26	27
Sapin Grandis	27	24	27	24	30	27	30	27	30	27	28
Douglas	26	23	26	23			27	23	27	23	31

Le domaine de validité de ce logiciel reste assez faible et se cantonne, notamment, aux sylvicultures à haute densité, ce qui le rend difficilement utilisable en France. Dans le contexte de la simulation, il permet toutefois de réaliser des comparaisons entre essences et, également, de vérifier l'adaptation

d'une essence à un type de sol du point de vue de la stabilité. Le douglas et le mélèze d'Europe sont les plus résistants au bris de tige. Pour les chablis, la profondeur d'enracinement permise par le sol (drainage) joue un rôle prépondérant indépendamment du système racinaire de chaque essence. Les sapins sont les plus stables. Les pins sont les plus fragiles ainsi que les épicéas sur sol superficiel v

Références bibliographiques

- BOUCHON J., 1987. Dégâts forestiers dus aux tempêtes : état de la recherche. In ENGREF : *Revue Forestière Française*, n° spécial « Les chablis », 4, 301-311.
- DHÔTE J.-F., 2000. Composition, structure et résistance des peuplements. In J.C. BERGONZINI & O. LAROUSSINIE : *Les écosystèmes forestiers dans les tempêtes*. GIP ECOFOR, Paris, pp. 101-116.
- FOURNIER, 1989. *Mécanique de l'arbre sur pied : maturation, poids propre, contraintes climatiques dans la tige standard*.
- GARDINER B.A., STACEY G.R., BELCHER R.E., WOOD C.J., 1997. Field and wind tunnel assessment of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry*, 70(3), 233-252.
- MILNE R., 1991. Dynamic of swaying of *Picea sitchensis*. *Tree Physiology*, 9, 383-399.
- OLIVER H.R., MAYHEAD G.J., 1974. Wind measurements in a Pine Forest during a destructive gale. *Forestry*, 47(2), 185-194.
- ROGIER P., FOURNIER M., 1992. Modélisation des modes propres d'oscillation d'un arbre : prise en compte de la flexibilité des branches. In B. THIBAUT : *Architecture, structure, mécanique de l'arbre*. 4^e séminaire, 144-153.
- STOKES A., 1999. Strain, distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind induced root movement. *Plant and soil* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands), 217, 17-27.
- STOKES A., DREXHAGE M., GUITARD D., 2000. A method for predicting the possible site of failure in trees during mechanical loading. In A. STOKES : *The supporting roots of trees and woody plants : form, function and physiology*. Volume in the series "Development in plant and soil science", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- WOOD C.J., 1995. Understanding wind forces on trees. In M.P. COUTTS & J. GRACE : *Wind and Trees*. Cambridge University Press, 133-164.