

Méthode d'analyse des états mécaniques des arbres : échelles linéaires et Scores Cliniques Prédicatifs

Philippe Trouillet, bureau d'études Ceiba

Les méthodes d'analyse des états mécaniques sont utilisées pour catégoriser et qualifier l'état mécanique d'un arbre. Ce sont des outils qui permettent de poser un diagnostic sur un état structural et d'évaluer un coefficient de sécurité¹. Afin de pouvoir catégoriser cet état, des échelles d'évaluation sont utilisées. Les échelles ont toutes un objectif commun : rendre objectif ce qui est subjectif.

Echelles linéaires

L'apparition de la méthode de diagnostic physiologique et ontogénique ARCHI (Drénou 2010) a remis en question les échelles linéaires d'appréciation (voir échelle² et schéma³ ci-dessous). En effet, les végétaux

ligneux sont des systèmes complexes qui, par nature, sont faits d'interdépendances et de réactions non linéaires. Ces réactions aux stress et ces interdépendances interdisent une projection des effets sur une ligne droite (échelle linéaire), mais peuvent être représentées sous forme de courbe (souvent exponentielle), et parfois de cercle dynamique permettant un retour à la normale, voire pour certains, un état considéré comme supérieur à l'état initial. Cette amélioration suite aux stress et aux contraintes est un phénomène courant, voire un standard des systèmes complexes dont font partie les organismes vivants.

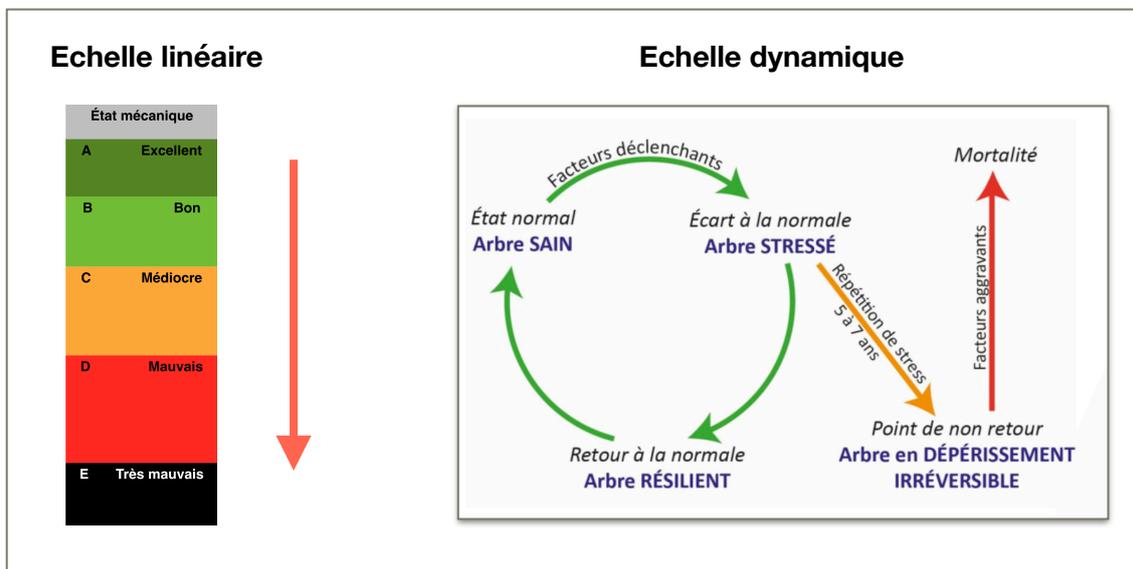
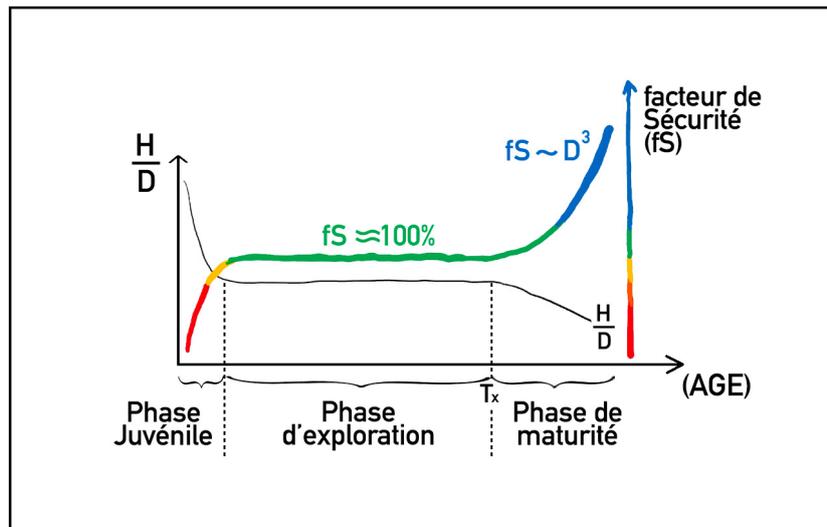


Figure 1 et 2 : deux types d'échelles de gradation d'état

¹ Le coefficient de sécurité est une donnée mécanique qui qualifie la Probabilité d'Échec (PdE). Il ne s'agit pas d'un diagnostic de risque associé aux arbres, qui, quant à lui, intègre la PdE dans ses variables afin d'évaluer le risque de dommage consécutif à l'échec d'un arbre ou d'un de ses organes.

² Selon l'échelle DIA (Diagnostic intégré de l'arbre), Moore W. Arbres et science 2003. Cette méthode basée sur une échelle linéaire permet toutefois une évolution négative ou positive des caractéristiques relevées.

³ Selon l'échelle dynamique ARCHI (Drénou 2010)



Graphique 1 : amélioration exponentielle du facteur de sécurité tout au long de la vie de l'arbre (d'après F. Rinn, 2021)

Antifragilité

Certains systèmes complexes ou vivants sont donc capables de tirer profit d'événements fortuits et de chocs imprévisibles plutôt que de les subir. Il ne s'agit pas de guérir, réparer, ou d'antidotes à ces événements, mais d'un besoin fondamental lié aux bénéfices consécutifs d'amélioration de ces systèmes nommés *antifragiles*. Les systèmes fragiles (par opposition sémantique, le contraire du mot fragile semblant n'exister dans aucune de nos langues) subissent et craignent quant à eux ces événements hasardeux. En effet, aucun objet ou matériau statique ne sera plus solide après avoir heurté le sol ou subi une contrainte dépassant son seuil d'élasticité. On les qualifie de fragiles car leur seuil de résistance mécanique est abaissé lorsqu'ils subissent de trop fortes contraintes engendrant des dégâts structurels. Ils ne peuvent tirer partie de tels événements. Le fragile sera donc toujours, et tout au long de sa vie, de plus en plus fragile, subissant les événements hasardeux. Les matériaux robustes sont eux plus résistants. Ils peuvent subir de fortes contraintes, et, pour certains, y être plus ou moins insensibles. Mais là encore, leur robustesse ne sera pas plus grande après le passage de tels événements. Et s'ils ne perdent pas de leurs propriétés pendant la durée de leur vie, ils ne s'amélioreront pas. Seuls les systèmes antifragiles apprenants tirent profit du hasardeux et du fortuit, et s'améliorent tout au long de leur vie pour peu

qu'on les y contraigne. Sollicités, ils deviennent ainsi de plus en plus performants. Voici quelques exemples antifragiles naturels que nous connaissons tous : les écosystèmes, les insectes sociaux, et tous les organismes vivants ; et quelques exemples antifragiles artificiels : les systèmes informatiques et certains systèmes économiques.

Les arbres : un système apprenant

Les arbres ont la capacité de percevoir et de répondre aux stimuli transitoires (principalement les vents). Ce phénomène se nomme la thigmomorphogénèse, ou mécano-perception. Ainsi, pour un arbre, les conséquences d'un coup de vent sont multiples et favorables dans le temps à une optimisation de ses facteurs de sécurité intrinsèques grâce à :

- Une inhibition de la croissance primaire (en hauteur)
- Un accroissement en diamètre des branches et du tronc
- Des métamorphoses géométriques
- Une surproduction de bois de réaction anisotrope
- Un accroissement racinaire

Ainsi un sujet sain est accordé à son environnement et voit, mécaniquement, son coefficient de sécurité s'améliorer dans le temps. Un arbre moyen possède un coefficient de sécurité situé entre 4 et 5. Mais les très vieux arbres avec des diamètres très importants (réponse de croissance

généralement consécutive à l'activité de champignons), et un houppier de plus en plus bas, peuvent avoir un coefficient allant jusqu'à 20, parfois 50, car ils augmentent ce facteur de 3 % à chaque 1% de prise de diamètre en améliorant de manière exponentielle leur rapport hauteur/diamètre (voir graphique 1).

Ces sujets ont pourtant souvent des cavités très importantes avec une PRBS⁴ parfois minimaliste, mais même en perdant un pourcentage de sécurité par la présence de ces caractéristiques, ils conservent un facteur de sécurité bien au dessus de la moyenne des arbres sans particularité et de diamètre moindre. L'échelle d'évaluation n'est donc pas linéaire dans ces cas de figure, et il s'agira d'une courbe exponentielle allant non vers la fragilité (de A à E, selon la méthode DIA) mais vers l'amélioration (de E à A), et bien au delà de l'état parfait initial A.

Il est cependant à noter que les systèmes fragiles ou robustes ne demandent pas de temps de récupération après l'application d'une contrainte, là où les systèmes complexes nécessiteront une période d'adaptation. Il est aussi bien sûr à préciser que tout système à ses propres limites, et que même les systèmes complexes peuvent connaître des dégâts irréversibles (défaillance primaire⁵). Ces notions d'antifragilité, de réversibilité et de temporalité complexifient donc considérablement le diagnostic structurel et questionnent l'intérêt, voire la possibilité, de donner un avis à un instant T sans lecture étayée et clinique de la dynamique de réaction du sujet.

Des arbres de plus en plus solide

Si les arbres sont antifragiles et peuvent donc s'améliorer, il semble nécessaire d'accepter qu'un sujet avec des symptômes évolutifs lents, chroniques, peut parfois être plus solide qu'un arbre sans particularité mais de moindre diamètre. Ainsi, par exemple, un arbre de 100 cm de diamètre avec une cavité symétrique de 60 cm possédera un coefficient de sécurité de 4, le double de celui d'un arbre plein de 50

cm de diamètre avec un rapport H/D médiocre (facteur de sécurité de 2⁶). Cet arbre à cavité pourrait donc, sur une échelle linéaire, obtenir une note A (parfait), et même au-delà sur une échelle dynamique malgré des caractéristiques marquées. Il en est de même pour une cavité ouverte largement compensée par des colonnes cambiales car ces renforcements confèrent une résistance accrue à la torsion, et améliorent très largement les comportements bio-mécaniques des tubes à la contrainte. Ce phénomène s'avère encore vrai en présence d'une forte modification géométrique du plateau racinaire en cas de colonisation fongique souterraine. Quant aux très vieux arbres avec des diamètres de tronc importants, ils possèdent des facteurs de sécurité intrinsèques si élevés qu'il est presque toujours inutile de chercher à les contrôler. Ces réflexions peuvent expliquer ce que nous observons tous chaque jour dans la nature : des arbres à particularités arrivent à passer sans trop de dommages les tempêtes, là où des arbres indemnes échouent. Faut-il considérer ces observations comme des *anormalités*, ou faudra-t-il un jour changer nos paradigmes, et accepter que les critères et les échelles mécaniques généralement utilisés sont aujourd'hui obsolètes? Ce nouveau paradigme pourrait donc modifier notre regard sur la bio-mécanique et les *défauts* d'une structure, mais aussi sur l'incidence des *parasites* fongiques qui semblent également capables d'actions profitables à la pérennité et la résistance des végétaux en les contraignant à des réponses d'antifragilité.

Comment catégoriser un état mécanique ?

Si en diagnostic physiologique les possibilités de résilience semblent aujourd'hui mieux acceptées et intégrées, le diagnostic mécanique pourrait lui aussi s'inspirer de l'échelle dynamique de la méthode ARCHI, avec la possibilité identifiée et théorisée d'optimisation mécanique, ou résilience mécanique, et d'un retour à la normale ou au-

⁴ PRBS : Paroi Résiduelle de Bois Sain

⁵ Une défaillance primaire est un défaut évolutif sans délai prévisible avant la défaillance secondaire (échec de la structure)

⁶ Sur ce cas fictif, les chiffres sont donnés à titre d'exemple

delà. Dans un autre champ disciplinaire, le monde médical a quant à lui limité les problématiques associées à la linéarité des échelles en choisissant des évaluations par *Scores Cliniques Prédicatifs* (SCP). De très nombreuses échelles médicales⁷ tentent ainsi d'évaluer l'avancée d'une problématique en intégrant un certain nombre de symptômes associés à une pathologie, avec une gradation individuelle de leur gravité. Le bilan comptable donne un score et une qualification de l'avancée de la problématique. Les SCP sont généralement utilisés pour éviter de faire des propositions thérapeutiques à des personnes non malades (vrai-négatifs). Chaque année, autour de dix mille publications scientifiques médicales traitent des SCP. Ils sont donc considérés avec la plus grande attention et leur utilité en médecine n'est plus à démontrer à partir du moment où les praticiens les utilisent avec pertinence comme compléments d'une démarche clinique rigoureuse. L'arboriculture pourrait ainsi, afin de tendre à des pratiques plus méthodiques dans le diagnostic et la formation au diagnostic, s'emparer du sujet SCP.

Tableau de Scores Cliniques Prédicatifs des facteurs de sécurité⁸

Le tableau, dans le paragraphe *Exemple*, est un SCP permettant d'aider à l'évaluation d'une Probabilité d'Échec de la ZRT⁹ en quantifiant chaque paramètre. Les choix retenus donnent un nombre de points associés (de -1 à 5) et leur addition propose un score final. Ce score qualifie les PdE dans le tableau « Résultats » et permet au praticien de justifier ses appréciations des facteurs de sécurité des arbres. Chaque évaluation doit nécessairement être cliniquement adaptée en pondérant les réponses afin d'adapter au mieux une situation aux paramètres généraux proposés.

Exemple

L'exemple proposé dans le tableau de SCP (scoré en jaune) est celui d'un platane architecturé en milieu urbain présentant une large cavité ouverte, des bourrelets et des contreforts de raidissement jugés efficaces et démarqués. Ce sujet obtient un résultat de 6. En comparant ce résultat au tableau¹⁰ des scores ci-dessous, l'information recueillie pourra ensuite être transposée comme PdE dans une méthode d'évaluation des risques (de 7 à 2 dans la méthode QTRA¹¹). En cas de risque de dommage en limite de tolérabilité, la PdE pourrait être confirmée ou infirmée par des investigations complémentaires et/ou de la mesure instrumentée.

Tableau de CPR des facteurs de sécurité

Matériaux résiduel		Adaptations géométriques		Rapport H/D (+-20% de marge)		Symptômes de pourriture évolutive	
• 100 %	1	• Caractérisées	-1	• <15	-1	• Aucun	1
• = 25% ou asymétrique	1,5	• Adaptatives	0	• Entre 15 et 30	0	• Superficiels, locaux	2
• entre 25 % et 10 %	2	• Relatives	2	• Entre 30 et 50	1	• Superficiels, + de 25%	3
• < 10 %	4	• Insuffisantes à nulles	5	• Entre 50 et 70	3	• Dommageables, peu compensés	4
				• >70	4	• Dommageables, non compensés/démarqués	5

⁷ Quelques exemples d'échelles médicales non linéaires : Grille fragilité *SEGA*, *Mini Nutritional Assessment*, échelle d'*Hamilton* d'évaluation de l'anxiété, etc...

⁸ Attention, la méthode CPR proposée dans cet article en est au stade de *proposition de scores* et d'*identification des facteurs prédicatifs*. Les *validations* sont actuellement en cours par des essais cliniques.

⁹ ZRT : Zone of Rapid Taper = Zone de conifération rapide des départs racinaires

¹⁰ Capacité de charge = Contrainte que peut supporter le sujet sans dommage (Charge admissible)
Charge de service = Contrainte subie par le sujet (principalement le vent dans le cas d'un arbre peu incliné)

¹¹ QTRA : Quantify Tree Risk Assessment (Ellison), méthode d'évaluation des risques quantifiés associés aux arbres

Résultat des scores/6 ZRT

Score	Facteur de sécurité	Effets sur la capacité de charge	Probabilité d'échec (PdE)	PdE QTRA
0 à 2,5	Au delà de 5	Capacité de charge très supérieure à la charge de service	Improbable	7
3 à 5,5	Entre 4 et 5	Capacité de charge supérieure à la charge de service	Très faible	6
6 à 8,5	Entre 2 et 4	Capacité de charge normalement (coef moyen) supérieure à la charge de service	Faible	5
9 à 11,5	Entre 1 et 2	Capacité de charge s'approchant de la charge de service	Echec possible sous contraintes très anormales	4
12 à 14,5	≈ 1	Capacité de charge plus ou moins égale à la charge de service	Echec possible sous contraintes anormales	3
> 15	< 1	Charge de service supérieure à la Capacité de charge	Echec possible sous contraintes courantes ou masse propre	2

Références

Drénou C. *La taille des arbres d'ornement*, CNPF 2021

Drénou C., Caraglio Y. "Parlez-vous Archi ?" : *les principales définitions de la méthode Archi*, Forêt Entreprise, Forêt Privée Française, 2019

Ellison M. *Practice note Quantify tree Risk Assessment*, QTRA Ltd 2020

Herzig et al. *Développement, implémentation et utilisation pratique d'un score diagnostique*, revue médicale suisse (revmed.ch), 2011

Moore W. *Arbres et Sciences n°10*, Vol III, juin 2003.

Rinn F. *Basic aspects of mechanical stability of tree Cross sections*, Arborist_News 2011

Rinn F. *Mature shell walls*, Western Arborist, 2013

Schwarze F. *Diagnosis and Prognosis of the Development of Wood Decay in urban trees*, Rowville, 2008

Taleb N. *Antifragile : Les bienfaits du désordre*, Broché 2013

Union régionale des professionnels de la santé « *les échelles d'évaluation et les classifications* » : www.urps-infirmiere-paca.fr