

LES CAHIERS D'ASTELLE

Articles scientifiques et techniques sur la biologie et les soins des arbres

N° 008

NOVEMBRE 2024

Diagnostic Intégré de l'Arbre

Partie II

Définition des termes

Élaboration des échelles pour l'évaluation de l'état d'un arbre

©William Moore, 14/11/2024. Tous droits réservés.

Atelier de l'Arbre Sarl.
La Lèbre, 24150, Lanquais.
Siret 491 621 445 0003



Portable : 06 82 87 90 13.
Fixe : 09 67 03 49 29.
Email : wmoore@arbre.net

RÉSUMÉ DIA PARTIE II

Dans DIA partie II, nous clarifions des termes ambigus employés dans le diagnostic de l'arbre, en particulier : stress, vigueur, vitalité et santé.

Par la suite, nous développons des échelles pour la présentation de l'état physiologique et

mécanique de l'arbre ainsi que des méthodes de diagnostic couramment utilisées. Nous élaborons également des échelles pour la quantification et la qualification du bois mort.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	4
2	DÉFINITION DES TERMES STRESS, VIGUEUR, VITALITÉ, SANTÉ	5
2.1	Définition du terme « stress »	5
2.1.1	En science physique	5
2.1.2	En physiologie de l'arbre	6
2.2	Définition des termes « vigueur » et « vitalité »	10
2.2.1	La vitalité	10
2.2.2	La vigueur	10
2.3	Définition du terme « santé »	10
2.4	Discussion	11
2.4.1	Un cas hypothétique	12
2.5	Conclusions	14
3	LA SANTÉ DE L'ARBRE. ETAT PHYSIOLOGIQUE ET ÉTAT MÉCANIQUE	15
3.1	État physiologique	15
3.2	État mécanique	15
3.3	État physiologique, état mécanique : phénomènes étroitement liés	15
4	ÉCHELLES POUR LA PRÉSENTATION DE L'ÉTAT DE L'ARBRE	17
4.1	Gradations d'une échelle pour la présentation de l'état de santé	17
4.2	Évaluation de l'état de santé	17
4.3	Échelle pour l'évaluation de l'état physiologique	18
4.4	Méthodes pour l'évaluation de l'état physiologique	18
4.4.1	Eau iodée et la réserve d'amidon	19
4.4.2	Vigueur	21
4.4.2.1	Croissance primaire	22

4.4.2.2	Vigueur : croissance secondaire	22
4.4.2.3	La résistance électrique de la zone cambiale.....	24
4.4.2.4	Vigueur : trois pièges.....	24
4.4.3	Épaisseur de l'aubier	25
4.4.4	Architecture	27
4.4.5	Autres paramètres.....	28
4.5	Échelle pour l'évaluation de l'état mécanique.....	28
4.5.1	L'état mécanique.....	28
4.5.2	Le facteur de sécurité.....	28
4.6	Méthodes pour l'évaluation de l'état mécanique.....	28
4.6.1	Le problème des seuils de sécurité.....	28
4.6.2	Philosophie de base de VTA et d'Auto-référencement Allométrique	30
4.6.3	Études de cas.....	31
4.7	Évolution de l'état de santé.....	36
4.7.1	La réversibilité de l'état de santé.....	38
4.7.2	Réversibilité naturelle.....	38
4.7.3	Réversibilité par traitement.....	38
5	ÉCHELLES POUR L'ÉVALUATION DU BOIS MORT	39
5.1	L'élagage naturel.....	39
5.1	Le dépérissement.....	39
5.1	Le bois mort n'est pas un défaut mécanique.....	39
5.1	Le profil du bois mort.....	39
6	CONCLUSION	40
7	RÉFÉRENCES	41

1 INTRODUCTION

Dans DIA partie I, nous avons exploré le vieillissement de l'arbre à travers l'hypothèse peau-cœur et à travers l'intercalage et le modèle des zones de l'arbre.

Dans DIA partie II, nous tentons de clarifier les termes couramment utilisés en diagnostic arboricole puis nous proposons des échelles et des méthodes pour l'évaluation de l'état de santé.

2 DÉFINITION DES TERMES STRESS, VIGUEUR, VITALITÉ, SANTÉ

Lorsque nous étudions les arbres, nous employons souvent les termes stress, vigueur, vitalité et santé. Il y a beaucoup de confusion à propos de ces termes dans la littérature scientifique et technique. Par exemple pour certains auteurs, le stress est la cause, et pour d'autres, c'est l'effet. Les termes vigueur et vitalité sont souvent utilisés pour dire la même chose. Vitalité et santé sont souvent confondues.

Cette confusion est frustrante car nous sommes obligés à chaque lecture de redéfinir notre vocabulaire. De façon générale, les auteurs omettent de définir les termes, il faut donc « deviner » ce qu'ils entendent quand ils utilisent un de ces termes. La nécessité de définir les termes scientifiques dans le domaine de l'arbre est reconnue par le Groupe d'Études de l'Arbre qui s'est investi dans le projet du Thesaurus au début dans les années 2000. Celui-ci a pour but de proposer des définitions les plus précises possibles pour les termes scientifiques problématiques. Les termes vigueur, vitalité et santé ont été abordés, Regnard, Lauri et Moore (2002).

Avant de procéder à l'évaluation de la santé d'un arbre, nous avons besoin de définir ce que l'on entend par les mots stress, vigueur, vitalité et santé et puis nous pouvons élaborer des échelles pour l'évaluation et la présentation de l'état de santé d'un arbre.

2.1 Définition du terme « stress »

2.1.1 En science physique

Le mot « stress » est emprunté à l'anglais, où le terme « stress » équivaut au mot « contrainte » utilisé par les physiciens Francophones. En fait, il n'y avait pas besoin d'emprunter ce mot qui est synonyme du mot contrainte !

En science physique, le terme stress a une définition très précise. Pour la terminologie qui suit, voir Stepine (1986) : « Un corps soumis à une force (qui s'exprime par exemple en Newtons

par Cm^2), subi une accommodation géométrique et se trouve dans un état contraint. La contrainte est définie comme la part de l'effort imposé et supporté par une facette d'élément infinitésimal du solide et s'exprime en newton par mètre carré. Différents types de contraintes peuvent être créés : contrainte de compression, contrainte de tension, contrainte de cisaillement.... L'état de contrainte d'un corps peut le déformer. La déformation peut être « réversible » : déformation « élastique », c'est-à-dire que l'objet reprend sa forme initiale lorsque l'effort est supprimé.

La propriété du corps à reprendre sa forme initiale s'appelle « élasticité ». Les déformations conservées par le corps à la suite de la suppression de l'effort sont des déformations « résiduelles » ou « plastiques ». Il s'agit d'une déformation irréversible. La propriété des matériaux à conserver les déformations résiduelles s'appelle « plasticité ».

Ces termes conviennent pour décrire les forces, contraintes et déformations concernant les structures de support de l'arbre. Cependant, la nuance suivante doit être prise en compte : un arbre est en mesure de produire des contraintes dans le bois qui sont capables de déformer un axe. Il s'agit d'une modification des précontraintes associée à la maturation des cellules à la suite de la division cambiale, Mattheck et Kubler (1995). Il en résulte un bois de réaction : bois de compression chez les gymnospermes et bois de tension chez les angiospermes. Le bois de réaction est important pour la résistance de l'axe aux contraintes provenant de l'extérieur et à la contrainte imposée par son propre poids. D'autre part, le bois de réaction joue un rôle dans l'orientation des axes. Les déformations qui en résultent peuvent être irréversibles, cependant, elles constituent un fonctionnement normal et essentiel pour l'arbre.

Le praticien s'intéresse aux contraintes et aux déformations qui produisent un dysfonctionnement mécanique de l'axe concerné. Il peut s'agir par exemple d'une fissure provoquée par une contrainte de cisaillement à la suite de la flexion d'un axe. Il peut également s'agir d'un

affaissement progressif d'un axe dû à un bois de réaction défectueux.

2.1.2 En physiologie de l'arbre

Les physiologistes ont emprunté le terme stress à la littérature physique pour décrire les processus physiologiques et c'est dans ce domaine que nous rencontrons des problèmes, car selon les auteurs l'utilisation des termes varie.

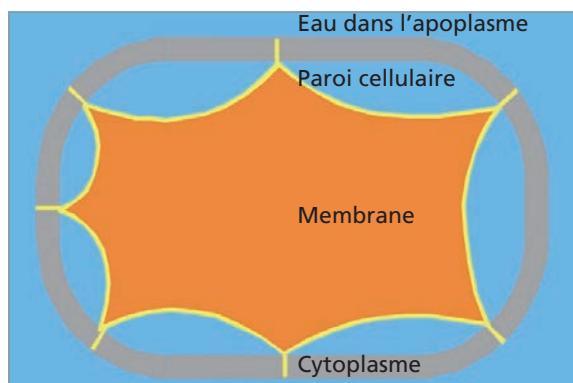
Pour Levit, dans Salisbury et Ross (1985), livre de référence : le stress est provoqué par un facteur environnemental agissant sur un processus physiologique. Voir encadré. Pour décrire l'état physiologique d'une plante, Levit suggère les termes :

- « Elastic biological stress », déformation biologique élastique.
- « Plastic biological strain », déformation biologique plastique.

En Français il n'y a pas de mot pour traduire le « strain » :

Anglais	Français
Stress	Contrainte (ou stress) provoquant une déformation élastique
Strain	Contrainte (ou stress) provoquant une déformation plastique

Certains auteurs ont « résisté » à ces définitions, par exemple Kramer (1980), l'objection principale étant que le terme stress a souvent été employé pour décrire le « strain ». Cependant, de nombreux physiologistes ont accepté les termes de Levit qui sont précis et réunissent la physiologie et la mécanique. La Fig.1 illustre ces concepts à travers la plasmolyse.

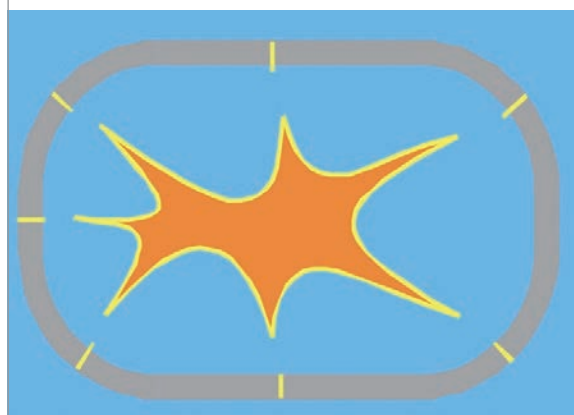


Déformation biologique élastique (stress).

Les cellules de l'arbre se baignent dans de l'eau qui est pour la plupart du temps en pression négative ce qui a tendance à extraire l'eau de la cellule. Le potentiel osmotique de la cellule s'oppose à cette force et retient l'eau dans la cellule et assure la turgescence.

Lorsque le potentiel osmotique n'est pas suffisant pour résister à la pression négative à l'extérieur de la cellule, l'eau sort de la cellule, la membrane décolle de la paroi et la cellule perd de la turgescence. Les feuilles sont flétries, les stomates sont fermés et la photosynthèse est impossible.

Il s'agit d'un état de plasmolyse réversible : soit il faut arroser la plante, soit il faut ajouter du sucre dans le cytoplasme et la feuille reprend la turgescence, sa forme et son fonctionnement normal.



Déformation biologique plastique (strain).

Lorsque la pression à la cellule externe est trop négative vis à vis du potentiel osmotique, l'eau sort de la cellule, la membrane décolle, les plasmodesmes sont brisés. Il y a rupture du symplasme et la plasmolyse est complète.

Il s'agit d'un état de dysfonctionnement irréversible.

Fig.1 La plasmolyse.

Shigo, (1986B), (voir encadré page suivante) se rapproche de Levit : « Le stress est un état réversible d'une partie de l'arbre ou de l'arbre entier et se produit lorsque la partie de l'arbre concernée, ou l'arbre entier, fonctionne au plus proche de la limite pour laquelle il est génétiquement conçu. Si le facteur provoquant le stress « pousse » la partie de l'arbre concernée ou l'arbre entier au-delà de la limite pour laquelle il est génétiquement programmé, la partie de l'arbre concernée ou l'arbre entier est dans un état de « strain » (déformation mécanique ou dysfonctionnement physiologique irréversible). Le « strain » est un état irréversible qui peut entraîner la mort des organes ou même l'arbre entier ». Dans cette définition, le stress résulte dans une déformation ou dysfonctionnement réversible et le « strain » présente la déformation mécanique ou dysfonctionnement physiologique irréversible.

Nous retrouvons des points communs : il y a la notion de facteur causal et de sa conséquence : un état réversible ou un état irréversible. Pour la personne chargée du diagnostic de l'arbre, le comportement physiologique et le comportement mécanique de l'arbre sont étudiés en même temps, il faut donc des termes qui s'équivalent pour décrire les causes et les effets.

Dans la méthode DIA, nous utilisons les définitions suivantes basées sur les définitions de Levit et Shigo pour le stress physiologique :

- Un état de stress physiologique résulte d'un changement des conditions de l'environnement qui peut nuire au fonctionnement optimal d'une partie de l'arbre ou de l'arbre entier ou le réduire et dans lequel l'état optimal est l'absence de stress.
- Un état de stress se traduit par le dysfonctionnement d'un processus physiologique d'une partie de l'arbre ou de l'arbre entier.
- Le dysfonctionnement peut être réversible ou irréversible.

Ces définitions peuvent ne pas convenir à tout le monde, néanmoins elles sont assez clairement et précisément exposées par Levit et Shigo et relient la physiologie et la mécanique.

La **Fig.2**, en page 9, récapitule les facteurs impactant le fonctionnement physiologique d'un arbre.

Nous tenons compte de la nuance suivante : un arbre peut présenter des dysfonctionnements physiologiques irréversibles locaux et sans que l'ensemble du système soit affecté :

1. Les arbres sont régulièrement soumis à des ouvertures naturelles et traumatiques, voies d'entrée pour les agents pathogènes. Ces zones sont compartimentées et contiennent des tissus morts physiologiquement inertes (dysfonctionnement physiologique irréversible). Ces zones restent fonctionnelles dans le support de l'arbre (tant qu'elles ne sont pas dégradées par les micro-organismes) et la protection de l'arbre. Néanmoins, le fonctionnement global de l'arbre n'est pas perturbé. Il s'agit des processus naturels de défense et de protection obligatoires pour la survie.
2. Une défoliation partielle et ponctuelle implique une diminution de l'énergie potentielle de l'arbre ce qui peut nuire aux processus physiologiques. Le dysfonctionnement des feuilles est irréversible, le dysfonctionnement de l'ensemble du système est réversible : la génération de nouvelles feuilles reconstituera, dans le temps, le niveau de réserves des métabolites.
3. Un arbre peut présenter des organes en fort déclin physiologique (dysfonctionnement irréversible) telles que des branches, racines, feuilles, destinées à être perdues par des processus physiologiques normaux sans que l'ensemble de l'arbre soit assujéti à un stress.

Shigo, 1986B. Stress and strain.

« Le stress est un état potentiellement dangereux mais réversible, provoqué par un manque d'énergie, disruption, ou blocage, ou par des processus de la vie opérant au plus proche des limites pour lesquelles ils sont génétiquement programmés. Le stress est un facteur de survie, en particulier pour l'arbre poussant en groupe ou en forêt. Un stress non maîtrisé provoque le « strain », un état irréversible et nuisible. Les animaux possèdent des mécanismes de sécurité pour empêcher l'état de stress de devenir un état de « strain ». Les muscles peuvent être travaillés, ou stressés, ou « poussés » près des limites pour lesquelles ils ont été génétiquement conçus.

Le muscle réagit à l'effort en formant plus de tissu et des cellules capables de résister à l'effort. De cette façon, les limites sont repoussées pour le muscle. Nous disons donc que l'exercice, ou le stress, subi par le muscle renforce cette partie du corps. Si un muscle est stressé ou travaillé près de ses limites, l'acide lactique s'accumule dans le muscle et provoque une crampe. La crampe est une protection pour empêcher le « strain » qui est irréversible ».

« Stress » et « strain » doivent être vus d'une façon différente pour les arbres. Les problèmes d'énergie et les facteurs biotiques ou abiotiques peuvent « pousser » un arbre, ou des parties d'un arbre, près des limites pour lesquelles ils sont génétiquement conçus. La perte de certaines parties de l'arbre afin de réduire sa masse dynamique, est une sécurité pour éviter le « strain ». Lorsque le stress atteint les limites, l'arbre, ou une partie de l'arbre atteint

le « strain » et meurt. Si le « strain » se produit dans l'arbre isolé, ou dans une branche, la partie concernée peut être isolée des parties saines par compartimentation. La branche peut rester fixée à l'arbre, cependant, la zone de protection à la base de la branche sépare les tissus de la branche sujette au « strain », des tissus du tronc. Cette séquence se produit lorsqu'un arbre isolé ou un petit groupe d'arbres est stressé. Les parties pouvant être perdues sont éliminées et d'autres parties sont compartimentées (descente de cime). Lorsque les parties restantes soumises au stress parviennent au « strain », l'arbre peut mourir (déclin, dépérissement total).

Néanmoins, stress et « strain » sont bénéfiques pour la forêt, car les individus les plus faibles meurent et ne se reproduisent pas. Le problème se pose lorsque « votre » arbre n'est pas un arbre de forêt, mais votre seul arbre. Dans ce cas, le passage du « stress » au « strain » est très mauvais. »

Levit. Stress and strain.**Le stress biologique**

Le stress biologique résulte d'un changement de conditions de l'environnement qui peut nuire au fonctionnement optimal d'une plante ou le réduire. Voir encadré, facteurs de survie, Fig.2.

La déformation élastique biologique

La déformation élastique biologique est un changement dans le fonctionnement d'un organisme à la suite d'un stress biologique qui retourne à l'état optimal lorsque le stress biologique est supprimé.

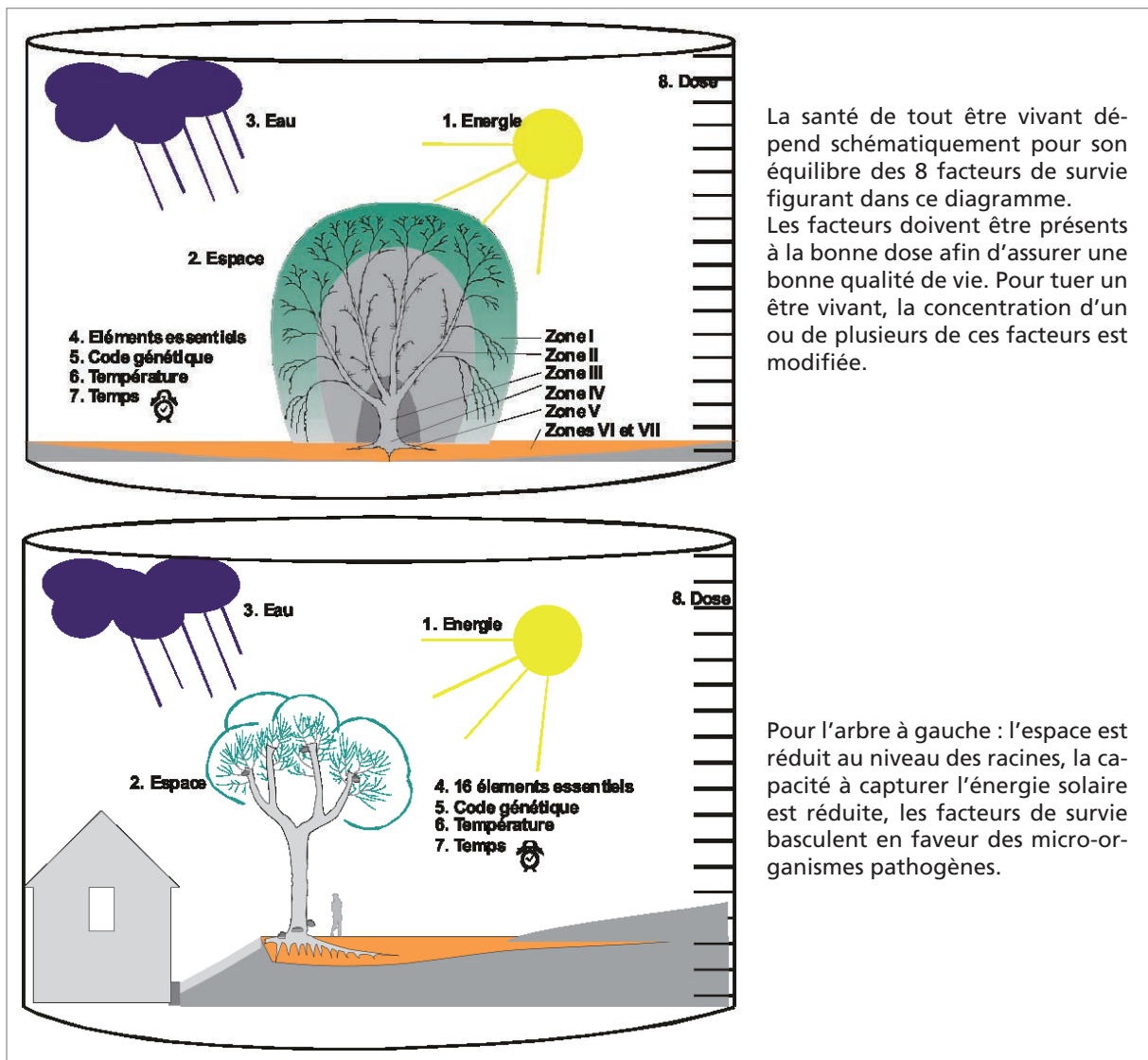


Fig.2 Le système arbre et la survie.

La survie et la mort. Shigo (1991), a suggéré la notion de « facteurs de survie ». La survie de tout organisme vivant dépend de huit facteurs, ils sont schématisés dans le diagramme en haut. La notion est intéressante, car elle regroupe l'ensemble des facteurs nécessaires pour que la vie puisse se produire. La santé de l'arbre est le résultat de l'interaction dynamique de ces facteurs. Le manque ou l'excès d'un des facteurs (en concentration ou dose) peut provoquer un état de stress. Pour qu'un arbre reste en bonne santé, nous tenterons d'assurer que l'ensemble des facteurs soient présents à la « bonne dose ». Un stress sévère entraîne une dégradation de la santé de trois manières :

1. Diminution des réserves de métabolites. Par exemple colonisation par micro-organismes et insectes et effets de la compartimentation.
2. Dysfonctionnement des organes. Par exemple colonisation par micro-organismes et insectes, empoisonnement, compaction du sol.
3. Défaut mécanique. Par exemple : incapacité de s'adapter mécaniquement à une contrainte, déformations anatomiques : écorce incluse, racines en chignon.

Un arbre peut continuer à survivre malgré des stress très sévères. Néanmoins, la qualité de sa vie est parfois diminuée à cause d'une prédisposition à la colonisation par les agents pathogènes, diagramme en bas.

2.2 Définition des termes « vigueur » et « vitalité »

La vigueur et la vitalité sont deux mots souvent mal employés. Nous retiendrons les définitions suivantes provenant du dictionnaire de Shigo (1986B), mais légèrement modifiées dans le thésaurus de groupe d'études de l'arbre par Regnard, Lauri et Moore (2002).

2.2.1 La vitalité

« La vitalité est la capacité génétique d'un organisme à résister à la contrainte. La capacité reflète le potentiel dont l'organisme dispose. La vitalité d'un individu ne peut être accrue. Son amélioration est un problème d'ordre génétique. Elle peut être évaluée en appliquant un stress croissant à un organisme et en mesurant la réponse. »

La vitalité est une affaire des généticiens et des pépiniéristes. Le professionnel des arbres s'intéresse parfois à la vitalité, par exemple :

- Sélection des arbres résistants à des maladies.
- Sélection des individus sans prédisposition génétique à produire des ramifications à écorces incluses.

2.2.2 La vigueur

La vigueur est l'expression de la quantité d'énergie consommée dans un processus de croissance :

« La vigueur exprime l'aptitude à croître dans des conditions données, l'aptitude étant l'expression dynamique de ce que produit un organisme avec les ressources dont il dispose. La vigueur est une caractéristique dynamique : elle implique croissance, reproduction et adaptation à l'environnement. La vigueur peut être stimulée par des pratiques culturales (fertilisation, mulching, aération du sol...) »

La vigueur peut être utilisée comme paramètre pour l'appréciation de la santé d'un arbre. Souvent, une baisse de vigueur est la première manifestation de stress physiologique. Une chute subite de la vigueur peut être contraignante pour

l'état de santé d'un arbre. Par exemple : diminution de l'espace pour le stockage des réserves, diminution de l'épaisseur du bois disponible pour le transport de la sève xylémienne, difficultés de consolidation des pièces mécaniquement affaiblies.

2.3 Définition du terme « santé »

Avant d'aborder l'évaluation de la santé d'un arbre, il est nécessaire de définir ce que l'on entend par le mot « santé ». Il est difficile de trouver une définition dans la littérature, même des livres clés sur le diagnostic de l'état de santé, par exemple Tattar (1989) et Strouts (1994). C'est un peu comme si on supposait que tout le monde sache ce qu'est la santé.

La définition proposée par Shigo (1991), est la suivante :

« Health is the ability to resist strain. Strain is a non-reversible condition resulting from an excess stress ».

« La santé est l'aptitude à résister au « strain » (= déformation/dysfonctionnement plastique). Le « strain » est un état non réversible résultant d'un stress excessif ».

Le terme santé est développé dans le dictionnaire de Shigo (1986B), voir aussi encadré sur les facteurs de survie, Fig. 2 :

« La santé est l'aptitude à résister au « strain ». La santé n'implique pas nécessairement une croissance rapide (vigueur). La vitalité est la capacité génétique à résister au « strain ». La santé est un état dynamique qui met en jeu un programme génétique intrinsèque soumis aux conditions environnementales. La santé est un état qui peut être gradué sur une échelle de faible à excellente. La santé est comme un « label de qualité », ces deux mots font état d'une condition qui nécessite un examen plus détaillé. Un organisme en mauvaise santé ne survivra pas longtemps. La survie implique de rester vivante dans des conditions potentiellement contraignantes ou létales. La santé et la survie sont des termes et des conditions étroitement liés. La survie est néanmoins le centre d'intérêt principal, car si la vie cesse, tous les autres points du débat

ainsi que les conseils avisés deviennent inutiles. Une excellente santé requiert un sujet vital au départ, qui sera maintenu dans des conditions satisfaisantes. Nous devons porter notre attention sur les facteurs préventifs pour la bonne santé de l'arbre, plutôt que de nous intéresser aux agents causaux des maladies. Les plus grands progrès du développement de l'humanité ont vu le jour après que les bienfaits d'une bonne santé, d'une hygiène sanitaire et corporelle, et d'une bonne alimentation aient commencé à porter leurs fruits. Nous devons emprunter le même chemin pour la gestion des arbres ».

Dans la définition de Shigo, la santé est une aptitude et un état, ce qui a été rejeté par la communauté scientifique francophone, nous proposons ici de préciser la pensée de Shigo :

« La santé est un état, résultant de l'aptitude de l'arbre à résister au « strain », déformations/dysfonctionnements irréversibles. Un bon état de santé n'implique pas nécessairement une croissance rapide (vigueur). La vitalité est la capacité génétique à résister au « strain ». La santé est un état résultant de l'enjeu dynamique d'un programme génétique intrinsèque soumis aux conditions environnementales. La santé est l'état résultant qui peut être gradué sur une échelle de faible à excellente. Un mauvais état de santé est souvent signalé par la manifestation d'un syndrome.

La santé est comme un « label de qualité », ces deux mots font état d'une condition qui nécessite un examen plus détaillé. Un organisme en mauvaise santé ne survivra pas longtemps. La survie implique de rester vivant dans des conditions potentiellement contraignantes ou létales. La santé et la survie sont des termes et des conditions étroitement liés. La survie est néanmoins le centre d'intérêt principal, car si la vie cesse, tous les autres points du débat ainsi que les conseils avisés deviennent inutiles. Une excellente santé requiert un sujet de bonne vitalité au départ, qui sera maintenu dans des conditions satisfaisantes. Nous devons porter notre attention sur les facteurs préventifs pour la bonne santé de l'arbre, plutôt que de nous intéresser aux agents pathogènes responsables des maladies. Les plus grands progrès du développement de l'humanité ont vu le jour après que les bienfaits d'une bonne

santé, d'une hygiène sanitaire et corporelle, et d'une bonne alimentation aient commencé à porter leurs fruits. Nous devons emprunter le même chemin pour la gestion des arbres ».

Syndrome : Association de plusieurs symptômes, signes ou anomalies constituant une entité clinique reconnaissable, soit par l'uniformité de l'association des manifestations morbides, soit par le fait qu'elle traduit l'attente d'un organe ou d'un système bien défini. Le Petit Robert. Dictionnaire de la langue Française, 2002.

2.4 Discussion

La santé est un état résultant de l'enjeu dynamique d'un programme génétique intrinsèque soumis aux conditions environnementales. L'état de santé peut être évalué par l'appréciation des symptômes qui se manifestent suivant des facteurs stressants environnementaux. La santé, la vitalité, le stress sont des paramètres quantifiables.

Chez les arbres, systèmes pérennes, qui génèrent régulièrement de nouveaux organes et tissus, les choses ne sont peut-être pas aussi clairement tranchées. Comme nous l'avons déjà dit, un arbre peut présenter des états irréversibles localisés (compartimentation d'agents pathogènes, branches dépérissantes par exemple) sans que son fonctionnement global n'en soit affecté. D'autre part, car il est en mesure de générer tous les ans de nouveaux organes et de mettre en place du nouveau bois et de l'écorce, des processus physiologiques peuvent être réparés dans le temps.

Par exemple : la sève xylémienne dans le système vasculaire peut être soumise à de fortes contraintes de tension. La cavitation et embolie des vaisseaux ou trachéides peuvent en résulter, provoquant le dysfonctionnement du système, provoquant le dysfonctionnement du système, Cruziat (2001). Certaines espèces d'arbres peuvent réparer les vaisseaux embolisés par la mise en place d'une pression positive de façon à remplir les vaisseaux embolisés d'eau et de les rendre encore fonctionnelles pour le transport de la sève xylémienne « dysfonctionnement réversible ». D'autres espèces doivent générer un nouveau système vasculaire car ils ne sont pas en mesure de réparer les vaisseaux embolisés

« dysfonctionnement irréversible ». Néanmoins, la mise en place d'un nouveau système vasculaire avant ou pendant la formation des feuilles, fait en sorte que l'arbre retrouve un système vasculaire fonctionnel. Il s'agissait donc d'un dysfonctionnement irréversible pour le système vasculaire mais d'un dysfonctionnement ponctuel et réversible pour l'arbre.

2.4.1 Un cas hypothétique

Imaginons que nous voulions étudier l'effet d'un champignon pathogène sur un arbre de génotype X. Trois arbres sont infectés avec respectivement 500, 1000, 1500 spores sur des blessures de taille égale. Le mycélium qui « essaie » de dégrader les composants phénoliques de la zone de réaction à l'aide d'enzymes provoquant ainsi une contrainte sur la zone de réaction. Nous constatons :

- Chez l'arbre infecté avec 500 spores, le mycélium se développe mais est rapidement compartimenté, il y a nécrose et dégradation des cellules dans la zone de compartimentation ce qui constitue un dysfonctionnement physiologique irréversible localisé. La perte de ce petit volume de cellules n'influence pas de façon sensible le fonctionnement global de l'arbre.
- Pour l'arbre infecté avec 1000 spores, la compartimentation est moins efficace et un grand volume de bois est infecté, le système vasculaire est perturbé provoquant un stress hydrique et la nanification des feuilles. La mortalité des cellules est beaucoup plus élevée que chez l'arbre précédent et il y a dysfonctionnement dans le transport de la sève xylémienne et dans la photosynthèse, d'où une baisse du niveau des réserves. La baisse des réserves prédisposera l'arbre à une colonisation par des agents pathogènes et nuira au fonctionnement global du système. S'agit-il d'un état réversible ou irréversible pour le fonctionnement global de l'arbre ? L'année suivante, nous constatons que l'arbre a réussi à compartimenter le champignon, à générer un nouveau système vasculaire ainsi que de nouvelles feuilles. Ces réserves commencent à se reconstituer. Il s'agissait donc d'un état réversible.

- Chez l'arbre infecté avec 1500 spores, le système vasculaire est rapidement colonisé et l'arbre perd 50 % de ses feuilles. Les branches en périphérie de couronne se dessèchent. Dans ce cas, le dysfonctionnement est très étendu et se caractérise par un dépérissement des rameaux et des feuilles ainsi que par la compartimentation d'un très grand volume du bois. Le niveau des réserves est réduit. L'année suivante, l'arbre réussit à mettre en place du bois initial. Cependant, le débourrement est en échec, faute d'un manque de réserves et l'arbre meurt. Dans ce cas, il s'agit bien d'un dysfonctionnement irréversible de l'ensemble du système.

Nous concluons que le seuil entre un état réversible et un état irréversible global de l'arbre se situe autour d'un inoculum de 1000 spores pour le génotype en question.

Nous poursuivons notre investigation. Nous voulons étudier l'effet de ce champignon sur deux génotypes soupçonnés d'être plus ou moins résistants au champignon.

Trois génotypes : W (expérience précédente) et X et Y, sont chacun infecté avec 1000 spores. Pour W, le mycélium ne se développe que très peu et pour Y, l'arbre meurt dans le courant de l'année. La résistance (vitalité) du génotype W est meilleure que pour X et encore meilleure que pour Y. Le stress a la même intensité dans chaque cas, cependant, la vitalité varie et il en résulte différents états de santé. **Fig.3.**

Il est nécessaire de préciser qu'un certain stress n'est pas mauvais pour l'arbre et qu'il est même important pour assurer sa santé. Les cas suivants servent à illustrer ce point :

1. Deux jeunes plantations : un arbre correctement arrosé et de façon régulière depuis sa plantation et l'autre, non arrosé, soumis régulièrement à un stress hydrique. L'arrosage est soudainement arrêté pour le premier arbre. Cet arbre entre dans une phase de dépérissement à la suite d'un stress hydrique tandis que la santé du deuxième arbre reste inchangée. Le deuxième arbre a pu s'adapter aux conditions hydriques du site et n'en est pas affecté.

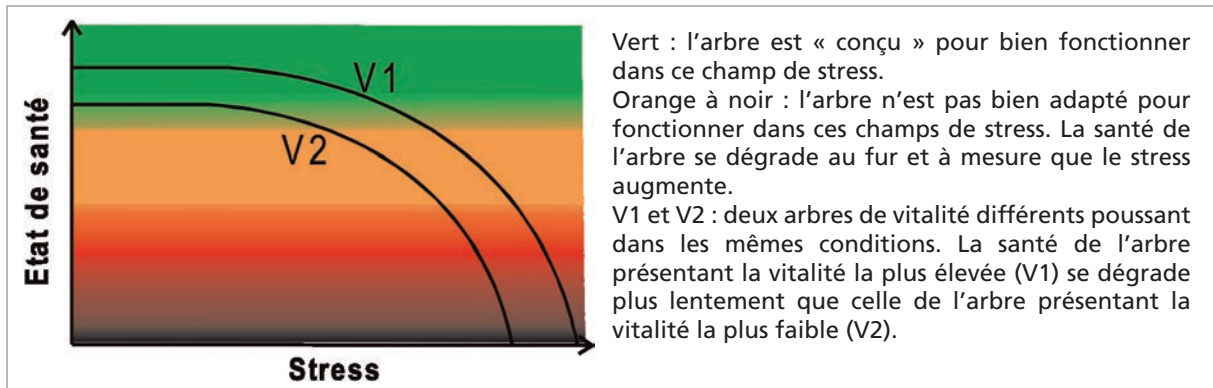


Fig.3 Santé, stress et vitalité.

Le stress subi par un arbre tout au long de sa vie est plus ou moins fort. Les arbres ont évolué pour fonctionner correctement dans un certain champ de stress. Au-delà de ce champ, la santé se dégrade et des parties de l'arbre commencent à dysfonctionner, elles deviennent plus vulnérables aux attaques parasitaires et à des fluctuations de l'environnement, et elles entrent dans des phases de dépérissement. L'arbre étant un système générateur, de nouvelles pièces peuvent pousser pour remplacer les pièces perdues, cependant, si le stress continue ou s'intensifie, l'ensemble de l'arbre peut dépérir et mourir.

2. Deux jeunes plantations : un arbre tuteuré de façon que le tronc ne puisse pas bouger face au vent (la force du vent est transmise au sol via le tuteur et non pas par le tronc et les racines). Un deuxième arbre non tuteuré, soumis régulièrement au stress mécanique occasionné par le vent. Le premier est brisé par le vent si on retire son tuteur, le deuxième reste intact. Le deuxième arbre, stimulé par le vent, s'adapte mécaniquement au stress rencontré. Le premier n'a pas pu s'adapter à cause du tuteur Jacobs (1939 et 1954).

3. Dans une expérience réalisée vers la fin des années 1990 (Inrae, Pierroton, Gironde, résultats non publiés), qui avait pour objet de connaître les effets de la fertilisation et de l'irrigation sur la morphologie des pins maritimes, les arbres arrosés et fertilisés ont été déracinés par la tempête de décembre 1999, alors que les arbres non fertilisés et non arrosés sont restés debout. Nous avons tendance à penser que la fertilisation et l'irrigation sont bonnes pour la santé de l'arbre, ce n'était pas le cas ici ! **Fig.4** et **Fig.5**.



Fig.4 Parcelle de pin maritimes traités. Arbres fertilisés et arrosés, couchés par la tempête de décembre 1999 (ils ont été partiellement redressés à l'aide de haubans).



Fig.5 Parcelle de contrôle. Arbres non fertilisés et non arrosés, debout après la tempête de décembre 1999.

2.5 Conclusions

Nous retiendrons les points suivants :

1. Le stress est un état résultant d'un changement des conditions de l'environnement (facteurs biotiques ou abiotiques) qui peut nuire au fonctionnement optimal de l'arbre ou d'une partie de l'arbre ou le réduire. Il peut s'agir d'un stress physiologique des fonctions physiologiques ou d'un stress mécanique des structures de support.
2. Une déformation/dysfonctionnement résultant d'un état de stress peut être classée comme réversible ou irréversible.
3. Un arbre peut présenter des déformations mécaniques ou dysfonctionnements physiologiques, irréversibles et locaux sans que l'ensemble du système en soit affecté.
4. La santé est un état, résultant de l'interaction dynamique d'un code génétique et de l'environnement.
5. La santé peut être évaluée sur une échelle qui va d'excellent à mauvais.
6. Les stress rencontrés peuvent nuire à la santé en affaiblissant le système, en diminuant les réserves métaboliques, et en prédisposant l'arbre aux autres stress.
7. Une excellente santé requiert un sujet « vital » au départ.
8. La « vigueur » n'implique pas nécessairement une bonne santé.

3 LA SANTÉ DE L'ARBRE. ÉTAT PHYSIOLOGIQUE ET ÉTAT MÉCANIQUE.

L'état de santé de l'arbre se divise en deux : état physiologique et état mécanique. Cependant, ces deux états sont étroitement liés.

3.1 État physiologique

L'état physiologique résulte de la capacité de l'arbre ou d'une partie de l'arbre, à résister aux stress pouvant provoquer un dysfonctionnement des processus physiologiques. L'état physiologique dépend du fonctionnement de plusieurs processus, en particulier, la capacité de l'arbre à :

- Capturer l'énergie solaire (photosynthèse).
- Stocker les réserves d'énergie (amidon).
- Croître (activité des méristèmes).
- Capturer de l'eau et les éléments essentiels (mycorhizes, actinorhizes, nodosités).
- Transporter les sèves (fonctionnement des systèmes vasculaires).
- Assurer sa protection (qualité du bois de protection, qualité des produits anti-microbiens naturellement présents).
- Se défendre (qualité de la zone de réaction, qualité de la zone de barrage, qualité des produits anti-microbiens formés suivant les ouvertures traumatiques), relations symbiotiques.

L'ensemble de ces processus est étroitement lié aux réserves de métabolites (énergie potentielle), disponibles dans l'arbre.

3.2 État mécanique

L'état mécanique résulte de la capacité de l'arbre ou d'une partie de l'arbre à résister à l'échec mécanique des organes de support.

Les arbres possèdent un certain « facteur de sécurité ». Le facteur de sécurité est la charge de ruine (contrainte nécessaire pour déformer ou briser un objet) divisée par la charge de travail (contrainte exercée par le travail normal

quotidien). Un arbre en bon état physiologique s'adapte mécaniquement à son environnement et aux défauts accumulés le long de sa vie, Mattheck (1994, 1995 et 2015), et tente de préserver le facteur de sécurité intact. Cependant, l'arbre n'est pas toujours en mesure de consolider ces points faibles en particulier lorsque l'arbre est en mauvais état physiologique, Mattheck (2003).

Des contraintes excessives agissant sur des pièces défectueuses peuvent provoquer l'échec de l'arbre. Dans le cas des défauts les plus graves, le poids de l'arbre pourra être suffisant pour engendrer un échec. D'autre part, les forces de la nature sont en mesure de briser un arbre même en parfait état de santé.

Les principaux types de défauts mécaniques rencontrés sont :

- Altérations du bois par les micro-organismes.
- Fissures.
- Déformations anatomiques, par exemple inclusions de l'écorce.
- Déformations morphologiques, par exemple racines en chignon.
- Changement de l'environnement, par exemple mise au vent et le rapport hauteur/diamètre, Mattheck (2003).

3.3 État physiologique, état mécanique : phénomènes étroitement liés

L'état physiologique et l'état mécanique sont étroitement liés :

- L'état mécanique est lié à l'état physiologique, par exemple : la qualité et la quantité de bois mis en place et l'adaptation des organes de support aux sollicitations mécaniques (thigmomorphogenèse), la mise en place d'un bois de réaction, la qualité du bois de protection, la qualité des mécanismes de défense, la formation des précontraintes dans le bois, sont tous dépendants des processus

physiologiques. De cette façon, un arbre en mauvais état physiologique aurait plus de mal à combattre des problèmes mécaniques qu'un arbre en bonne santé physiologique.

- L'état physiologique dépend de l'état mécanique car si l'arbre perd une grosse partie, par exemple une fourche en Fig. 7, sa capacité de photosynthèse sera divisée par deux, ce qui entraînerait une nette diminution de son aptitude à résister aux stress physiologiques.

Un arbre peut néanmoins présenter un bon état mécanique et un mauvais état physiologique, Fig.6. Inversement, il peut présenter un excellent état physiologique et un mauvais état mécanique, Fig.7.



Fig.6 État physiologique et état mécanique.

La charge de travail de ce tilleul est très faible et la probabilité de rupture est faible malgré une forte colonisation par des agents pathogènes lignivores. Son état physiologique est mauvais : manque de surface photosynthétique, mutilation, mauvais rapport énergie masse.

Il n'y a pas de risque significatif pour le public.



Fig.7 État physiologique et état mécanique.

Ce tilleul argenté présente un excellent état physiologique mais l'état mécanique est mauvais à cause des multiples écorces incluses dont une fissurée (flèche).

Il y a risque significatif pour le public.

4 ÉCHELLES POUR LA PRÉSENTATION DE L'ÉTAT DE L'ARBRE

4.1 Gradations d'une échelle pour la présentation de l'état de santé

L'état de santé d'un arbre peut aller d'excellent à mauvais. Le diagnostic doit utiliser une échelle allant donc d'excellent à mauvais. La question se pose concernant le nombre de gradations nécessaire entre ces deux extrêmes. Un grand nombre de gradations, au-delà de cinq par exemple, rendrait l'analyse des données et la lecture des résultats complexe. D'autre part, à l'heure actuelle, nos méthodes d'investigation ne permettent pas un diagnostic aussi précis. L'utilisation d'un petit nombre de gradations, trois par exemple, rendrait l'analyse des résultats ainsi que leur lecture plus facile, mais il ne permettrait pas de connaître le profil de santé d'un arbre ou d'un ensemble d'arbres dans le détail.

Dans la méthode DIA, cinq gradations sont utilisées afin de permettre une analyse la plus précise possible et le plus simple possible pour un arbre ou un ensemble d'arbres Fig.8. Les gradations sont représentées par des codes de couleurs allant du vert foncé et vert clair pour les arbres en bon état, en passant par l'orange, le rouge et le noir pour les arbres présentant des problèmes importants.

Parfois, il est nécessaire de se prononcer sur des problèmes potentiellement évolutifs : l'évolution anticipée. Ceci permet à la personne chargée d'un patrimoine de localiser les arbres présentant des problèmes de santé potentiellement évolutifs et de mettre en place un programme de suivi de ces arbres. Dans cette méthode, l'évolution anticipée d'un problème décelé est évaluée sur une période de cinq ans. La période de cinq ans est retenue parce que l'expérience a montré que c'est la période sur laquelle il est raisonnablement possible de se prononcer.

4.2 Évaluation de l'état de santé

L'évaluation de l'état de santé se déroule en cinq étapes :

- 1. Détection des symptômes pouvant indiquer des problèmes de santé.
- 2. Qualification des problèmes détectés.
- 3. Quantification des problèmes détectés.
- 4. Évaluation de l'état de santé immédiat.
- 5. Évaluation de l'évolution de l'état de santé.

État de santé			Évolution anticipée
	A	Excellent	Le symbole « ↗ » ou « + » indique une possible amélioration dans les 5 ans à venir. Le symbole « ↘ » ou « - » indique une possible dégradation de l'état d'un arbre dans es 5 ans à venir.
	B	Bon	
	C	Médiocre	
	D	Mauvais	
	E	Très mauvais	

Fig.8 Gradation de l'état de santé.

4.3 Échelle pour l'évaluation de l'état physiologique

L'état physiologique de l'arbre est le bilan des éléments indiquant, ou pouvant indiquer, un dysfonctionnement des processus physiologiques ou une modification de la capacité de résistance au stress physiologique, de tout ou partie de l'arbre.

En ce qui concerne l'état physiologique, **Fig.9**, les arbres notés en vert foncé (excellent) évoluent dans des conditions environnementales pour lesquelles ils sont bien adaptés. Les arbres notés en vert clair (bon), présentent des désordres passagers ou une baisse dans les réserves d'amidon. Les arbres notés en orange (médiocre), fonctionnent au seuil de leur capacité à résister aux agents de stress physiologique. Les arbres notés en rouge (mauvais) et en noir (très mauvais) sont soumis à des stress si forts que leur survie est mise en danger.

Important : un arbre classé en orange ou en rouge peut redevenir vert clair ou vert foncé. Pour les arbres classés en noir, c'est plus difficile mais n'est pas impossible.

4.4 Méthodes pour l'évaluation de l'état physiologique

Le but de ce chapitre est de guider le lecteur vers les outils utilisés pour l'évaluation de l'état physiologique, non pas de décrire les méthodes en grand détail. Pour un arbre malade, il est rare qu'un seul outil suffise, la plupart du temps l'utilisation de deux ou plusieurs des outils est nécessaire.

L'évaluation de l'état physiologique est souvent difficile, à cause de la subjectivité du diagnostiqueur et du manque d'échelles de référence. D'autre part, un arbre malade peut manifester plusieurs symptômes (syndrome) et il n'est pas toujours facile de distinguer le ou les causes. Pour minimiser la subjectivité dans l'évaluation de l'état physiologique, l'utilisation de paramètres quantifiables est souhaitable.

Le diagnostiqueur doit toujours garder en tête pour référence : l'arbre parfait et l'arbre moribond.

Etat			Exemples	Réserves	
	A	Excellent	Arbre ne présentant pas de problème significatif.	Haut	
	B	Bon	Désordres liés aux problèmes passagers par exemple : défoliation partielle et ponctuelle, stress hydrique ponctuel, ou aux contraintes répétées dans le temps, mais qui n'entraînent pas de dépérissement. Arbre ou une partie de l'arbre présentant une baisse dans le niveau de réserves de métabolites.		
	C	Médiocre	Arbre présentant un dysfonctionnement prononcé et/ou le dépérissement d'un ou des organes. Arbres présentant des réserves de métabolites médiocres.		
	D	Mauvais	Déclenchement d'un dépérissement de l'ensemble des organes de l'arbre.		
	E	Très mauvais	Arbre moribond ou mort. Réserves de métabolites très faible à non existants.	Bas	

Fig.9 Gradation de l'état physiologique.

Évolution anticipée :

Le symbole « ↗ » ou « - » indique une possible amélioration dans les 5 ans à venir, le code couleur passerait par exemple d'orange en vert clair.

Le symbole « ↘ » ou « + » indique une possible dégradation de l'état d'un arbre dans les 5 ans à venir le code couleur passerait par exemple de vert clair en orange.

En ce qui concerne les méthodes assez facilement quantifiables, nous pouvons prendre en compte les réserves d'amidon, la vigueur : la croissance primaire et la croissance radiale, l'épaisseur de l'aubier et l'architecture.

4.4.1 Eau iodée et la réserve d'amidon

Évaluation visuelle de la réserve d'amidon et possible en utilisant de l'eau iodée (IKI), une solution de 2% d'iode dissous dans de l'iodure

de potassium. Shigo (1986b), Wargo (1975b, 1988), Fanget (1998). Les amyloplastes dans les cellules du symplasme deviennent bleu/noir à l'application d'eau iodée, **Fig.10**.

Ce test doit être réalisé en fin d'été ou après la chute des feuilles en automne lorsque les réserves sont au maximum. Éviter les périodes de gel car certaines espèces, érables, noyers par exemple, transforment l'amidon en sucres solubles qui sont transférés à la sève xylémienne pour baisser le point de gel.

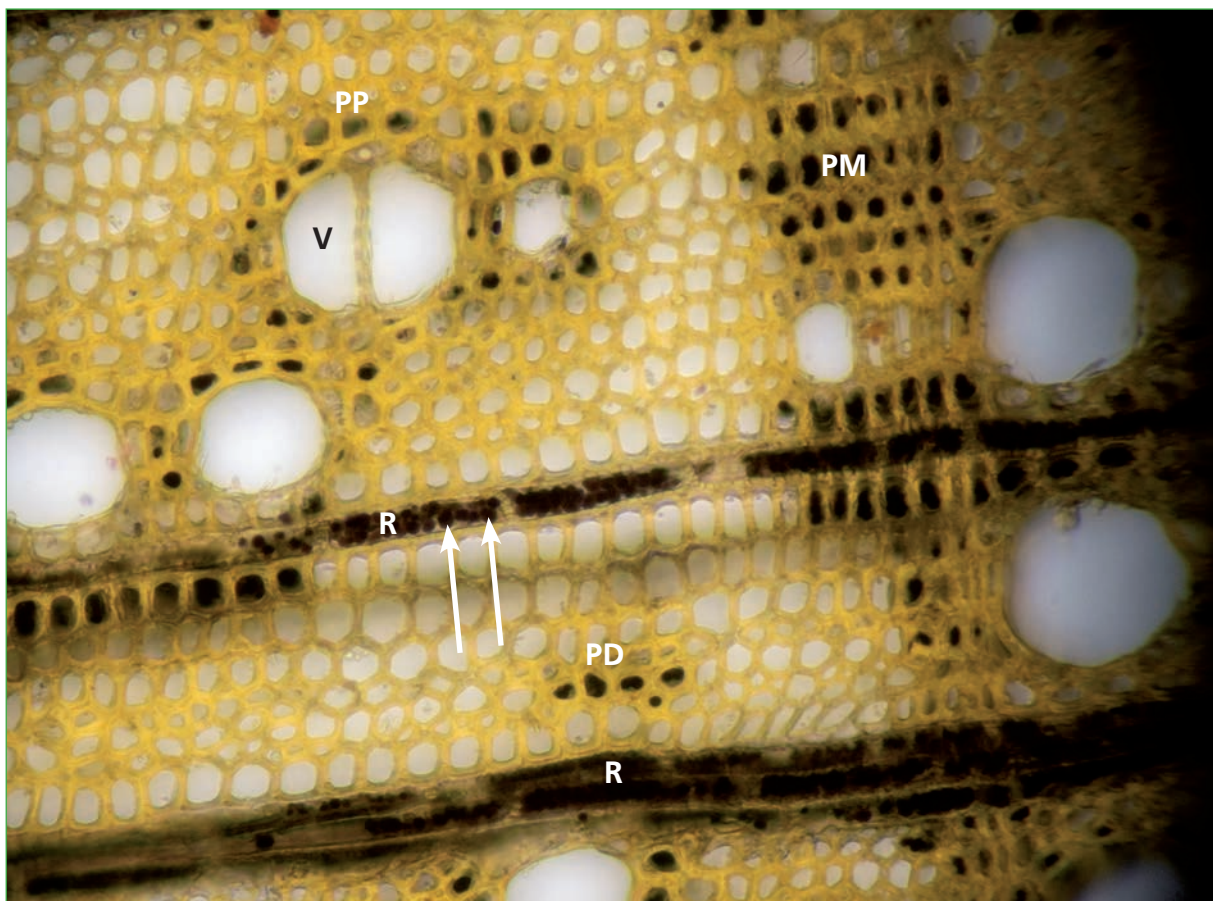


Fig.10 Amyloplastes dans l'aubier d'un érable plane.

Les vaisseaux, V, environ 50 microns en diamètre. Amyloplastes (flèches), dans le symplasme : R : rayon, PP : parenchyme périvasculaire, PM : parenchyme marginal, PD : Parenchyme diffus entre les fibres. Les fibres sont jaunes avec les lumens vides.

Le test peut-être réalisé sur des carottes prises dans le tronc à l'aide d'une tarière, **Fig.11**. Garder en tête que la distribution des réserves varie selon la partie de l'arbre concernée et selon la conduite,

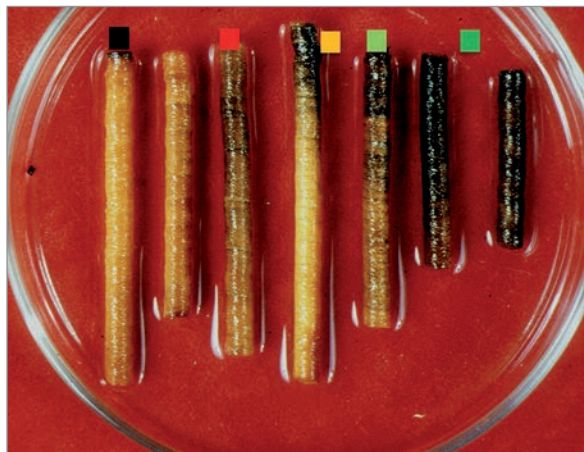


Fig.11 Orme.

Sept ormes à divers états de dépérissement à cause de la graphiose de l'orme. Photo Alex Shigo.

Bory et al (1994), **Fig.13**. Favoriser les tests aux racines là où les réserves sont les plus élevées, **Fig.12**. Pour bien faire, plusieurs échantillons de racine de petit diamètre doivent être observés.



Fig.12 Hêtre commun.

Réserves d'amidon dans les racines de deux hêtres. A gauche : arbre malade. A droite : arbre sain.

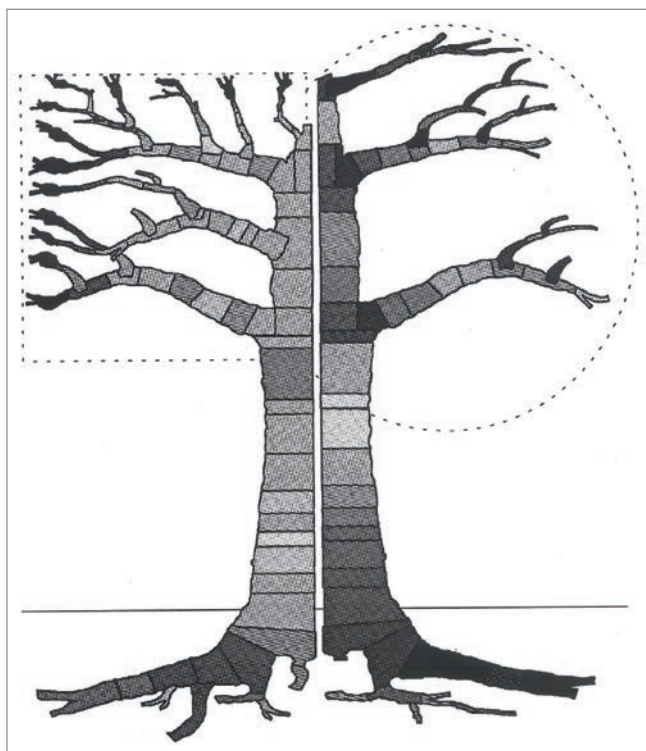


Fig.13 Distribution des réserves d'amidon dans des platanes âgés de 80 ans. A droite arbre en forme semi libre, à gauche arbre en rideau.

4.4.2 Vigueur

La vigueur présente l'avantage d'être assez facilement évaluée en utilisant certains indicateurs :

1. La vigueur de la croissance primaire est évaluée en mesurant la longueur des unités de croissance.
2. La vigueur de la croissance secondaire est évaluée :

- En mesurant l'épaisseur des cernes de croissance.
- En mesurant la résistance de la zone cambiale à un courant électrique alternatif à l'aide d'un Shigomètre.

Un stress significatif se traduit par une baisse, plus au moins subite dans la croissance primaire et la croissance radiale, **Fig.14**, mais voir les pièges signalés en fin de chapitre.

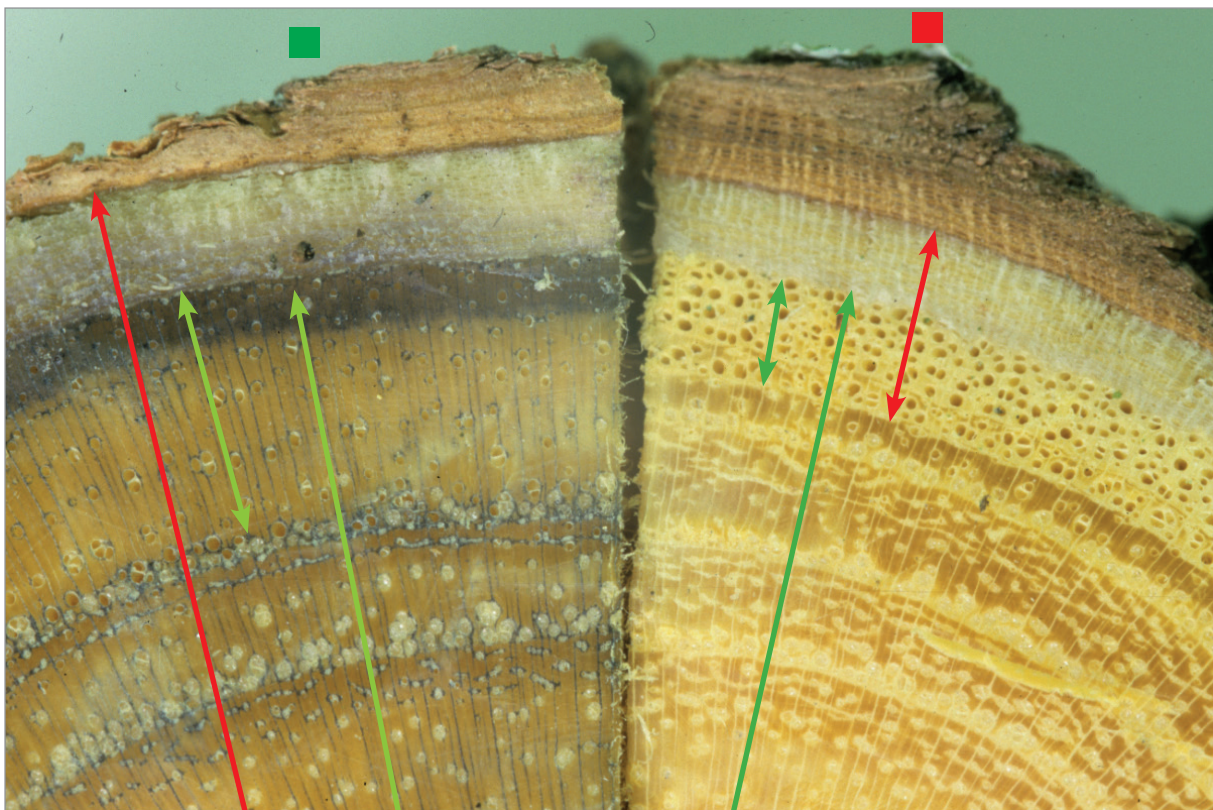


Fig.14 Vigueur forte et vigueur faible. *Robinier pseudoacacia*.

A gauche, un arbre présentant une forte vigueur : la flèche à double tête indique une année de croissance. La flèche verte indique 2,5 années de croissance.

A droite, un arbre présentant une faible vigueur. La flèche verte à double tête indique environ 6 cernes de croissance. Il y a six ans, un événement environnemental a mis l'arbre sous stress. La flèche verte indique environ 10 années de croissance.

Les flèches rouges indiquent l'épaisseur des tissus vivants disponibles pour le stockage des réserves d'amidon (pour l'échantillon de gauche la partie vivante s'étale au-delà de la photo en bas).

Ces deux échantillons de robinier sont noyés en IKI : à gauche réserves normales ; à droite réserves épuisées.

4.4.2.1 Croissance primaire

La croissance primaire est évaluée en observant la croissance en longueur des unités de croissance. Un problème se pose chez les arbres ou les marqueurs s'effacent (zone d'abscission des écailles des bourgeons). Fig.15.

Plusieurs échantillons doivent être observés car la vigueur est parfois variable entre les différentes parties de la Zone I. Fig.16.

4.4.2.2 Vigueur : croissance secondaire

L'extraction d'une carotte du tronc à l'aide d'une tarière de type « Pressler » fournira l'historique de la croissance radiale depuis des dizaines d'années. La carotte est rafraîchie à l'aide d'un scalpel et l'épaisseur des cernes est mesurée à l'aide d'une loupe binoculaire ou d'un microscope.

Exemple d'utilisation en Fig.17, Fig.18 et Fig.19.



Fig.15 Frêne commun. Flèche : zone d'abscission des écailles. Trait : unité de croissance.



Fig.16 Frêne. Variabilité des unités de croissance pour trois individus de différentes vigueurs.

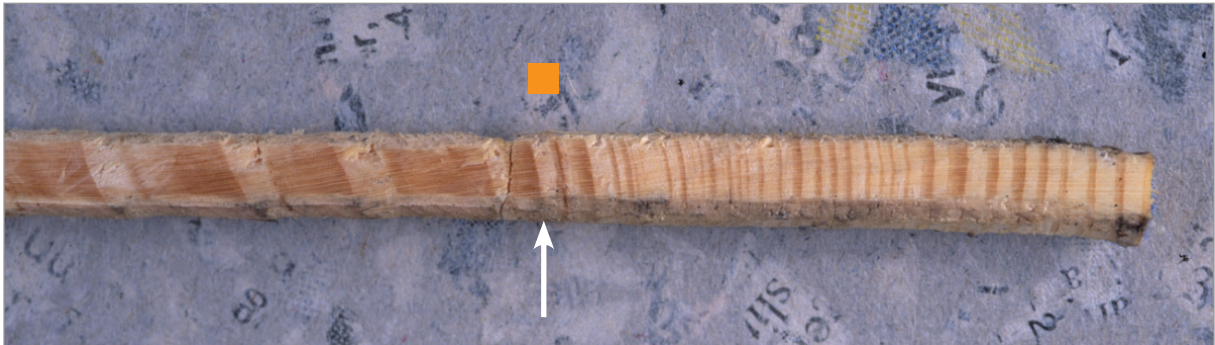


Fig.17 Baisse subite de la vigueur.

Une carotte prise dans le tronc d'un chêne dépérissant.

La flèche indique le moment où la vigueur de la croissance secondaire a commencé à baisser, il y a 29 ans.



Fig.18 Chêne chevelu. Récemment planté.

Le chêne chevelu en Fig. 18 fait partie d'un alignement planté l'année précédant la prise de la photo. Il est dépérissant avec galeries de scolytes dans l'écorce du tronc.

Il a été vendu comme avoir été transplanté cinq fois en pépinière.

Une étude dendrochronologique de trois des arbres a été réalisée, Fig. 19 :

Une phase de transplantation est visible, le repiquage en pépinière a provoqué un stress physiologique marqué par un effondrement subit dans la croissance radiale en 2001. Il est aussi noté un effondrement dans la croissance radiale l'année de la réalisation de la plantation.

Les arbres ont été transplantés une seule fois en pépinière.

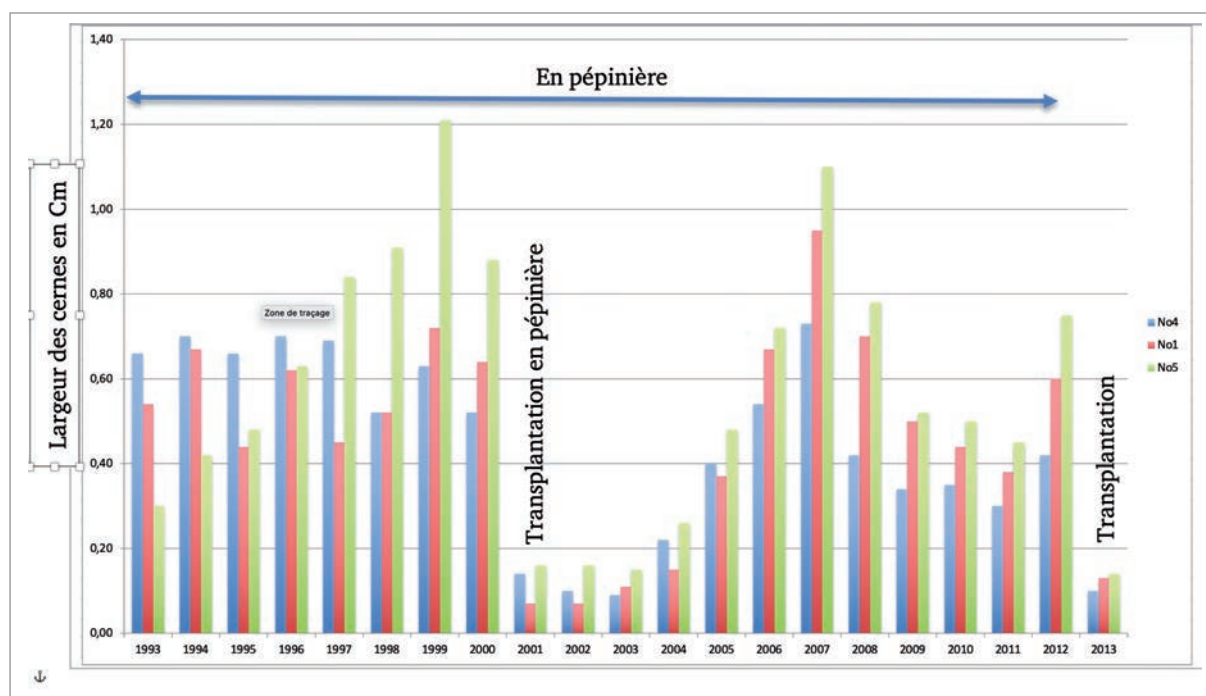


Fig.19 Dendrochronologie de trois chênes chevelus, Fig. 18.

4.4.2.3 La résistance électrique de la zone cambiale

Le Shigomètre peut être utilisé pour évaluer la résistance électrique de la zone cambiale qui reflète la vigueur. La résistance électrique du cambium baisse dans les arbres à forte vigueur à cause de la présence de potassium, utilisé dans la synthèse de ATP, adénosine triphosphate. Shigo (1986a). Cet appareil n'est plus commercialisé, mais peut être fabriqué à la maison. Voir : Blanchard et al (1983) ; Davis et al (1980) ; Garrec et al (1989) ; Glomb et al (1989 et 1996) ; Macdougall et al (1988) ; Wargo (1975a).

Le Shigomètre permet aussi de mesurer les variations de vigueur dans des différentes zones d'un seul arbre : vigueur cambiale faible en Zone I, vigueur cambiale forte en Zone IV. Elle permet aussi de comparer la vigueur dans une population d'arbres identiques et d'ainsi cibler les arbres les plus faibles. C'est un outil très intéressant pour la pédagogie.

4.4.2.4 Vigueur : trois pièges

L'utilisation de la vigueur pour l'appréciation de la santé d'un arbre comporte des pièges :

1. Les arbres sévèrement élagués (étêtage, rapprochement), présentent des unités de croissance anormalement grandes dans une tentative de rétablir une Zone I adéquate. De tels arbres présentent un faible taux de réserves et il faut plusieurs années pour rétablir un niveau de réserves adéquat, Bory (1994). En fait, la vigueur de ces arbres est faible si on tient compte de la vigueur de la croissance secondaire qui présente une baisse aussi dramatique que les pousses annuelles sont grandes.
2. Les arbres peuvent présenter une faible vigueur en étant en parfaite santé. La vigueur est une expression de l'environnement. Un bouleau poussant dans la toundra n'a pas la même vigueur que le bouleau évoluant dans le Massif Central de la France. Pourtant, ces deux arbres sont en bon état de santé. Même des

changements du milieu local peuvent avoir une forte incidence sur la vigueur, **Fig. 20** et **Fig. 21**.

3. Les arbres fortement fertilisés, en particulier avec de l'azote, présentent une très forte vigueur. Pour certains auteurs, par exemple Shigo (1991), cette biomasse, qui est mise en place, puise dans les réserves de métabolites, les réserves baissent et on constate un affaiblissement de l'état physiologique de l'arbre.

4.4.3 Épaisseur de l'aubier

L'épaisseur de l'aubier est assez facile à apprécier à partir d'une carotte prélevée à l'aide d'une tarière de type « Pressler ». Il faut tenir compte 1) du type de bois de protection présent : duramen, bois coloré, faux cœur et cœur mouillé, 2) Système vasculaire : angiospermes, bois à zones poreuses, bois à pores diffus, bois intermédiaire ; conifères, bois à trachéides.

Pour certaines espèces à duramen, souvent les espèces à zones poreuses, l'épaisseur de l'aubier est variable, le chêne commun et le noyer par exemple. L'épaisseur de l'aubier diminue à la fois avec le stress physiologique mais aussi avec le vieillissement, Sellin (1994).



Fig.20 Vigueur faible, santé bonne.

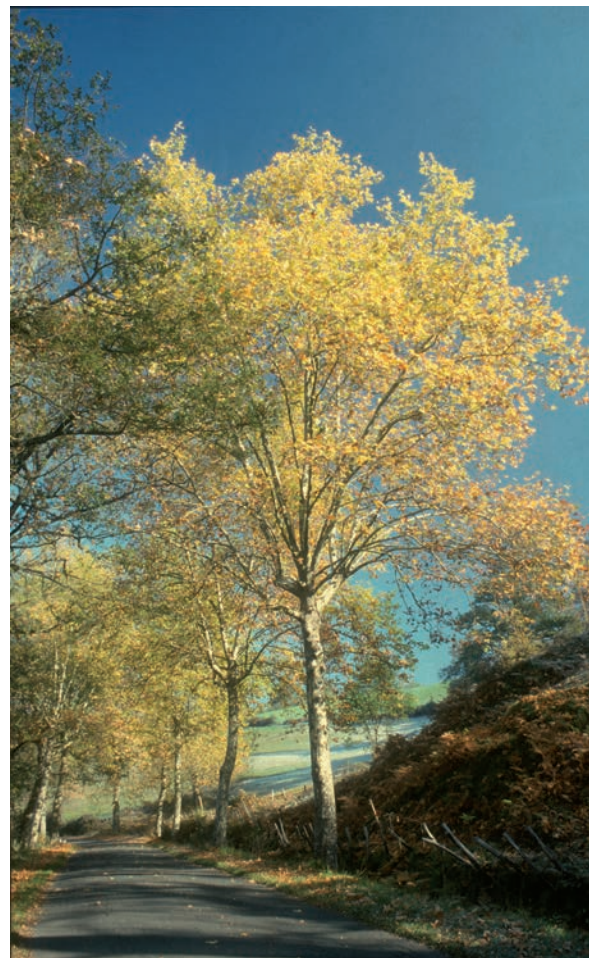


Fig.21 Vigueur forte, santé bonne.

Deux platanes d'alignement à un âge identique (près de 100 ans). **Fig.20** : vigueur faible, l'arbre mesure moins de 10m de hauteur. **Fig.21** : vigueur forte, l'arbre mesure près de 30m de hauteur. Les deux arbres présentent probablement la même vitalité et le même état de santé.



Fig.22 Marronnier sain. Pores diffus.

Chez un marronnier sain, l'aubier est vivant et fonctionnel de la moelle juste au cambium. Note : cet arbre a été injecté avec un produit phytosanitaire d'où la formation du bois coloré à côté des numéros.

Le robinier et le châtaignier ont une épaisseur d'aubier fixe d'environ trois cernes. Cependant, un robinier sous fort stress génère que du bois initial et non pas du bois final, dans ce cas plusieurs cernes restent vivants, tel est le cas du robinier en Fig.14.

Pour les arbres qui ne font pas du duramen, souvent les espèces à pore diffus, un bois coloré ou cœur mouillé est formé par suite des ouvertures traumatiques. L'épaisseur d'aubier diminue au fur et à mesure que le bois coloré ou le cœur mouillé se forme, Fig.22 et Fig.23.

Le flux de la sève xylémienne augmente par un facteur de 16 chaque fois que le diamètre d'un vaisseau double. Les essences à pore diffus possèdent des vaisseaux de petit diamètre, 60 microns chez le marronnier. Les arbres zones poreuses ont des gros vaisseaux dans le bois initial qui peuvent mesurer jusqu'à 300 ou 400 microns de diamètre chez le chêne ou le robinier. Il faut 4096 vaisseaux de 50 microns de diamètre pour conduire la même quantité de sève xylémienne qu'un vaisseau de 400 microns de diamètre. Du coup, chez les arbres à pore diffus, une grande épaisseur d'aubier est nécessaire pour assurer le flux en sève xylémienne. La vigueur baisse avec la diminution dans l'épaisseur de l'aubier.



Fig.23 Érable de Norvège malade. Pores diffus.

Pour un érable de Norvège avec des infections racinaires provoquées par l'armillaire couleur de miel (*Armillaria mellea*), champignon lignivore pathogène, les colonnes du bois dégradé remontent dans le collet et l'épaisseur d'aubier est impacté. Cet arbre présentait une vigueur très faible liée à la diminution dans le nombre de vaisseaux disponible pour le transport de la sève xylémienne.

4.4.4 Architecture

L'architecture est un outil formidable pour l'appréciation de l'énergie potentielle d'un arbre. Pour un arbre malade, l'architecture devient progressivement désorganisée au fur et à mesure que les réserves de métabolites baissent. Une connaissance fondamentale en architecture est impérative, Caraglio (1994 - 2024).

Plus récemment Drénou et Caraglio (2019), Drénou (2021), proposent la méthode « Archi » qui tente à établir l'état physiologique et la capacité de réaction des arbres stressés. Dans la méthode « Archi », pour l'apprentissage, un schéma de l'arbre en question est réalisé montrant : l'ossature d'origine dessinée en noir et les suppléants (rejets), dessinés en rouge, Fig.24 et Fig.25. Puis l'utilisateur utilise des clefs de détermination pour classer l'arbre parmi sept types comme indiqué en Fig.26. Cette méthode facilite la classification dans les échelles DIA et de se prononcer sur l'évolution possible.



Fig.24 Chêne en question.



Fig.25 Le schéma Archi.

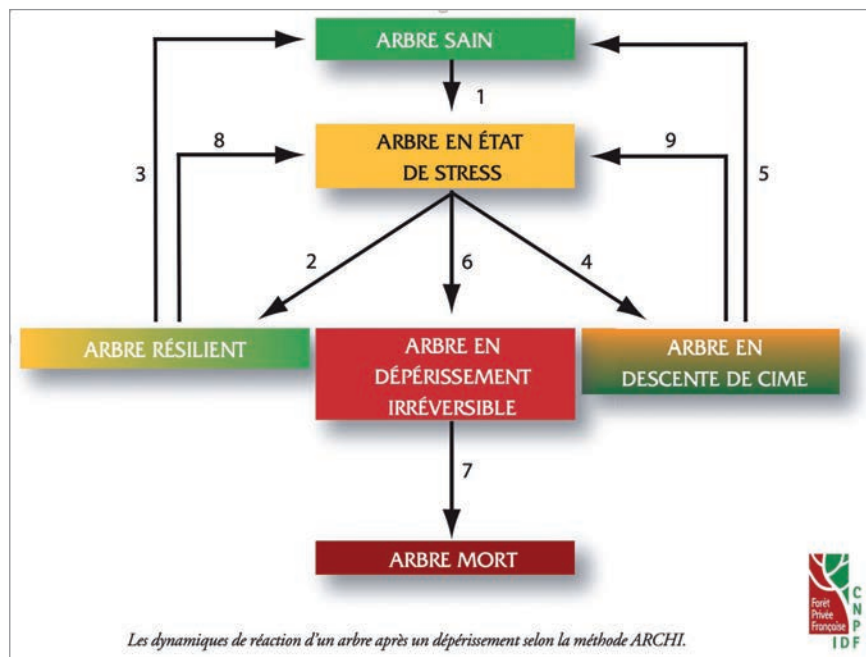


Fig.26 Typologie d'arbres dans la méthode Archi.

4.4.5 Autres paramètres

Le diagnostiqueur a à sa disposition d'autres paramètres tels que :

- Couleur des feuilles.
- Taille des feuilles.
- Morphologie du houppier : transparence de la Zone I, Fanget (1998), Nageleisen (1996), Roloff (1991).
- Présence d'agents pathogènes et de parasites.
- Sens de la chute des feuilles. Normalement basitipal (du haut vers le bas), sauf les arbres qui font des axes néoformés, le peuplier d'Italie par exemple, ou les feuilles sommitales néoformées tombe en dernier.

4.5 Échelle pour l'évaluation de l'état mécanique

4.5.1 L'état mécanique

L'état mécanique est le bilan des défauts mécaniques observés. Le défaut mécanique est un élément anatomique, morphologique, biologique, ou environnemental inhabituel, dont la présence résulte dans une dégradation du facteur de sécurité et éventuellement une rupture. Sa qualification peut être effectuée en fonction de différents critères tel que sa proportion, sa localisation, sa nature.

4.5.2 Le facteur de sécurité

Lors d'une investigation sur la santé mécanique de l'arbre, le diagnostiqueur tente d'évaluer l'intégrité du facteur de sécurité. Le facteur de sécurité est calculé en divisant la charge de travail par la charge de ruine. Il n'y a très peu de recherche du facteur de sécurité chez les arbres. Il a été évalué entre 4 et 4,5 par Mattheck et Kubler (1995), voir aussi Lonsdale (1999). Cependant, la valeur 4 à 4,5 doit être utilisée avec précaution car il n'y a très peu d'études scientifiques réalisées.

Si le facteur de sécurité est égal à 1, la charge de travail est en mesure de briser l'arbre. La charge de travail pour les arbres est égale à des conditions

météo « normales », nous ne tenons pas compte des événements météo exceptionnelles, échelle de Beaufort >7, qui sont en mesure de briser des arbres sains et d'arracher les toitures.

Dans la méthode DIA nous utilisons toujours cinq gradations pour l'évaluation de l'état mécanique. La gradation va d'un facteur de sécurité intact à un facteur de sécurité complètement dégradé. **Fig.27.**

4.6 Méthodes pour l'évaluation de l'état mécanique

En diagnostic mécanique, l'analyse visuelle de l'arbre (VTA, Visual Tree Assessment), tel que décrit par Mattheck et Breloer (1994) et Mattheck (2015), permettra, pour le diagnostiquer expérimenté, de localiser et d'évaluer les défauts mécaniques dans la grande majorité des cas. Ces guides expliquent le développement des symptômes et les cataloguent. Les défauts décelés sont qualifiés : altérations du bois, inclusions de l'écorce, modifications de l'environnement, contraintes de développement, etc. Au besoin, les anomalies sont investiguées par des moyens simples, percussion avec un marteau par exemple, allant à des méthodes sophistiquées tel que le Résistographe, le Fractomètre ou le Shigomètre, Moore (1998 et 2000).

4.6.1 Le problème des seuils de sécurité

Bien que la partie analyse visuelle de l'arbre de la méthode VTA du professeur Claus Mattheck constitue la base incontournable du diagnostic mécanique de l'arbre, le seuil de sécurité proposé de $t/R > 0,32$ (ou t = l'épaisseur de la paroi et R est le rayon de la section), proposé en VTA est largement critiqué et considéré comme étant trop sévère en particulier pour les arbres au stade « Adulte » et « Sénescence ». Dans la nature, nous observons beaucoup de très vieux arbres en forme libre, debout, depuis longtemps, des centaines voire des milliers d'années, avec les valeurs largement inférieures à $t/R 0,32$.

A l'opposé, dans la méthode Statique Intégré de l'Arbre, SIA, proposé par Wesolly et Erb (1998,

Etat			Facteur de sécurité	Typification du défaut.
■	A	Excellent	Facteur de sécurité intact.	L'arbre est mécaniquement optimisé. Des cavités volumineuses peuvent être présentes mais n'impactent pas le facteur de sécurité.
■	B	Bon	Facteur de sécurité partiellement diminué. La charge de service est inférieure à la charge de ruine	Défaut mécanique présent. Par exemple cavités symétriques où la paroi résiduelle est encore éloignée des valeurs critiques et avec absence de fissuration longitudinale. Une écorce incluse présentant des bons renforcements mécaniques.
■	C	Médiocre	Facteur de sécurité égale à 1. La charge de service est à peu près égale à la charge de ruine.	Défaut mécanique présent. Un facteur déclenchant assez fort, orage estivale par exemple, est nécessaire pour engendrer un échec.
■	D	Mauvais	La charge de service est supérieure à la charge de ruine.	Défaut mécanique présent. Un facteur déclenchant assez faible est nécessaire pour engendrer un échec.
■	E	Très mauvais	La charge de service est largement supérieure à la charge de ruine.	Défaut mécanique présent. L'arbre risque de se briser sous son propre poids ou par une très faible force déclenchante.

Fig.27 Gradation de l'état mécanique.

Lorsque le défaut est éloigné des valeurs critiques, (vert), le facteur de sécurité de l'arbre (charge de service / charge de ruine) est proche de la valeur normale pour un arbre sain. Le facteur de sécurité peut être partiellement diminué, le défaut est encore éloigné des seuils critiques, en ce cas, la partie défectueuse est classée vert clair. Lorsque la partie défectueuse approche des seuils critiques, le facteur de sécurité est diminué et approche la valeur 1 pour lequel la charge de service est égale à la charge de ruine, (orange).

Lorsque le défaut a dépassé les seuils critiques, la charge de service est supérieure à la charge de ruine (rouge et noir).

Évolution anticipée :

Le symbole « ↗ » ou « - » indique une possible amélioration dans les 5 ans à venir, le code couleur passerait par exemple d'orange en vert clair.

Le symbole « ↘ » ou « + » indique une possible dégradation de l'état d'un arbre dans les 5 ans à venir le code couleur passerait par exemple de vert clair en orange.

2016), les parois résiduelles requises sont tellement faibles que nous ne pouvons pas les croire : un platane de 38 m en hauteur avec un diamètre de 121 cm serait 100 % sûr sous ouragan avec une paroi résiduelle de seulement 28 mm ! De tels arbres n'existent pas dans la nature car ils sont déjà effondrés. Il y a donc des erreurs dans les calculs. **Fig.28.**

En ce qui concerne le rapport H/D (hauteur divisée par le diamètre à hauteur du poitrine), pour les arbres isolés, Mattheck (2003), suggère un seuil situé entre 40 et 50. Mattheck démontre que pour

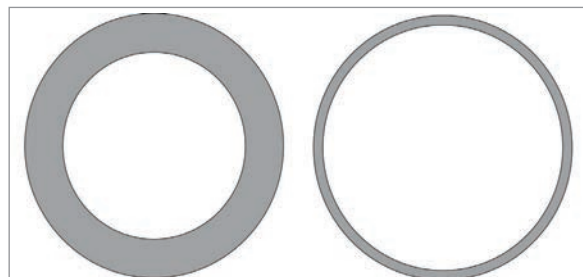


Fig.28 Le conflit des seuils de sécurité.

À gauche : VTA : 70% creux. Réduction en volume requise.

À droite : SIA : 93% creux, 100% sûr sous ouragan.

la majorité des arbres isolés le rapport H/D se situe entre 10 et 40. A l'opposé, la méthode SIA est excessivement sévère par rapport à H/D. Les utilisateurs de cette méthode sont très souvent amenés à réduire en hauteur les arbres en parfaite santé, avec aucun défaut mécanique comme illustré ci-dessous. Ce qui n'est pas souhaitable ! **Fig.29** et **Fig.30**.

A l'heure actuelle, ces seuils sont source d'une grande confusion dans le domaine, Moore (2004), Rinn (2018). Néanmoins nous voyons à l'horizon la méthode « Auto-référencement Allométrique » proposé par Frank Rinn qui est en cours d'améliorer le diagnostic mécanique. Plusieurs publications sont disponibles en ligne à <http://www.rinntech.com>.



Fig.29 Hêtre pourpre, note DIA « A », excellent. 329 x 32. H/D 33.

SIA : réduction en hauteur de 2,5m requise pour assurer la sécurité.

VTA : facteur de sécurité intact. Aucune intervention requise.

4.6.2 Philosophie de base de VTA et d'Auto-référencement Allométrique

Les arbres existent depuis plus de quatre millions d'années et ils ont « appris » comment optimiser leurs structures de support. C'est la philosophie de la méthode VTA de Mattheck et de la méthode « d'Auto-référencement Allométrique » de Rinn (2021). Seul l'arbre « connaît » avec précision le facteur de sécurité et il agit du sort de le maintenir intact.

Dans la méthode Auto-référencement Allométrique, les propriétés des parties de l'arbre sans défaut sont utilisées pour évaluer la perte en portance des sections dégradées du même arbre. Un peu comme en **Fig.33** et **Fig.34**. Dans la méthode



Fig.30 Tulipier de Virginie, note DIA « A », excellent. 338 x 37. H/D 34.

SIA : réduction en hauteur de 5,7m requise pour assurer la sécurité.

VTA : facteur de sécurité intact. Aucune intervention requise.

de Rinn, la qualité du bois est largement moins importante que la géométrie des sections creuses. Ceci parce que la capacité de porter une charge augmente par puissance trois par rapport au diamètre (D^3). Ceci explique pourquoi à partir du stade « Adulte » les arbres deviennent de plus en plus stable avec chaque couche de bois qui s'ajoute et pourquoi le seuil de sécurité VTA de $t/R > 0,32$ n'est pas valable pour les arbres ayant obtenu leur hauteur maximale.

Ce sujet est trop vaste pour aborder en détail ici, néanmoins nous étudierons un des principes de base et quelques études de cas et comment intégrer les échelles DIA.

4.6.3 Études de cas

La force du vent coule des feuilles au sol à travers un arbre comme l'eau dans une rivière coule des montagnes vers la mer. Le plus qu'il a de l'eau, plus la rivière est large. Un arbre fonctionne de la même manière, plus le flux de la force est grand, plus les organes de support sont larges. Lorsque le flux d'eau rencontre un obstacle, îlot, cercle en **Fig. 31** la rivière devient plus large, le flux est pareil juste avant l'îlot, pendant le passage de l'îlot et juste après l'îlot. La contrainte agissant sur les rives est toujours égale. C'est ce que Mattheck appelle la « distribution uniforme de la contrainte ». Les défauts mécaniques chez l'arbre se manifestent visuellement par une croissance adaptative. Il est nécessaire d'apprendre comment lire le langage corporel de l'arbre. **Fig.32**



Fig.31 L'arbre est une rivière. Photo : Derry Moroney.

Les arbres réagissent à la manière d'une rivière : en Fig.32, un chicot en cours de dégradation dévie le flux des forces et une croissance adaptative se

produit. L'arbre est mécaniquement optimisé et le chicot dégradé ne constitue pas un défaut mécanique, note « A », excellent.



Fig.32 Croissance adaptative.



Fig.33 Chêne, symptôme de goulot. Le bas du tronc présente une cavité symétrique volumineuse.

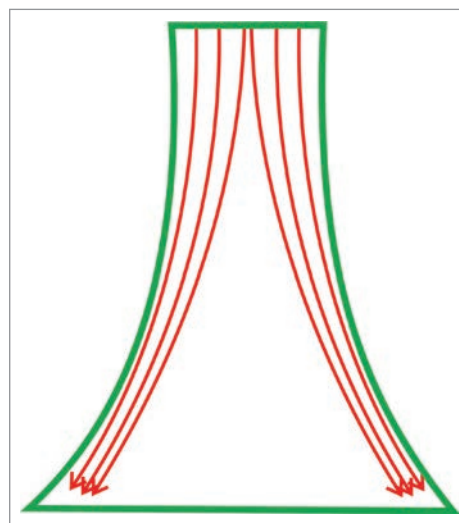


Fig.34 Formation du goulot. Flèches : flux de la force.

Pour le chêne en Fig.33 le flux des forces, flèches rouges en Fig.34, est dévié dans la paroi résiduelle autour de la cavité interne. La croissance est accrue d'où la formation du « goulot ». Le goulot augmente l'inertie et donc la stabilité de l'arbre. Cependant la paroi est réduite à 16 cm en moyenne pour un rayon de 90 cm soit un t/R de 0,17. Il y a un doute quant à la stabilité.

Une carotte prise dans le tronc à 8 m du sol, flèche du haut, sert comme témoin. La résistance du bois à la flexion en utilisant le Fractomètre est en moyen 5 MPa. Dans la paroi résiduelle, flèche en bas, la résistance du bois à la flexion est en moyenne 29 MPa, soit 6 fois plus robuste que le bois éloigné de la cavité. Cette méthode de témoignage est publiée par Mattheck (1995), méthode baptisée plus récemment « auto-référencement » par Rinn qui développe le protocole en utilisant d'autres paramètres.



Fig.35 Marronnier.

Non seulement l'inertie de l'arbre augmente par la formation du goulot mais la paroi est largement renforcée. Note « B », bon, avec une flèche descendant à cause de la présence du champignon pathogène chancreux *Collybia fusipes* qui a dégradé une racine et formée une nécrose corticale remontant à un mètre de hauteur du tronc. L'arbre nécessite des examens rapprochés pour suivre l'évolution du syndrome.

Le marronnier en Fig.35 présente un léger goulot en bas du tronc indiquant une cavité symétrique interne. Il y a aussi des nervures longitudinales indiquant que la paroi est fissurée. Les nervures se forment à cause de l'amplification des contraintes autour des fissures.

La dissection, Fig.36, montre la cavité interne avec une paroi relativement fine. A cause de la fissuration multiple provoquée par les intempéries le défaut est noté en « C », médiocre, le facteur de sécurité est érodé et les conditions météo normales seront en mesure de briser le tronc par contraintes de flexion et de torsion. Néanmoins une tempête assez violente est nécessaire pour déclencher une rupture.

L'analyse visuelle couplée d'une percussion par marteau est suffisante pour poser le diagnostic.



Fig.36 Marronnier de la photo précédente.



Fig.37 Tilleul face tension.



Fig.38 Tilleul face compression.

Le tilleul patrimonial en Fig.37 et Fig.38 présente des symptômes d'inclinaison progressive : fissure transversale dans le rhytidome côté tension et écrasement du rhytidome du côté compression. Flèches blanches. Le diamètre du tronc à ce niveau est 150 cm.

Le sondage par Résistographe a permis de voir une paroi très réduite (5 cm) sur la face tension, R1 en Fig.39, mais une paroi supérieure à 38 cm du côté compression.

Les symptômes visuels et la paroi réduite à 5 cm du côté tension permettent de noter le défaut en « D », mauvais. Le facteur de sécurité est jugé < 1 . Un facteur déclenchant relativement faible pourrait engendrer une rupture.

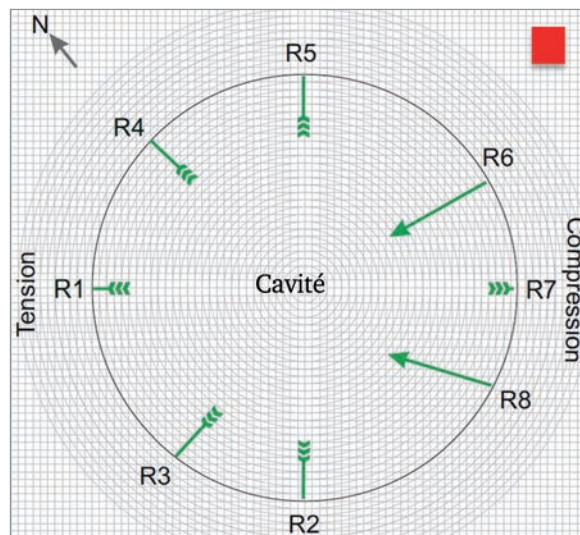


Fig.39 Section transversale.

L'examen visuel du tilleul en Fig.40 permet de constater un arbre au point d'échec :

- Flèche de gauche : écrasement du rhytidome du côté compression. Flèche du centre : fructification de *Kretschmaria deusta*, champignon pathogène chancreux.
- En Fig.41 : fissures transversales du côté tension.

Ces symptômes visuels sont suffisants pour se prononcer sur l'état de l'arbre. Aucune autre investigation est nécessaire. Note « E », très mauvais, le facteur de sécurité est complètement dégradé et l'arbre peut tomber de son propre poids. En fait il est tombé deux semaines après la prise des photos par temps clément.

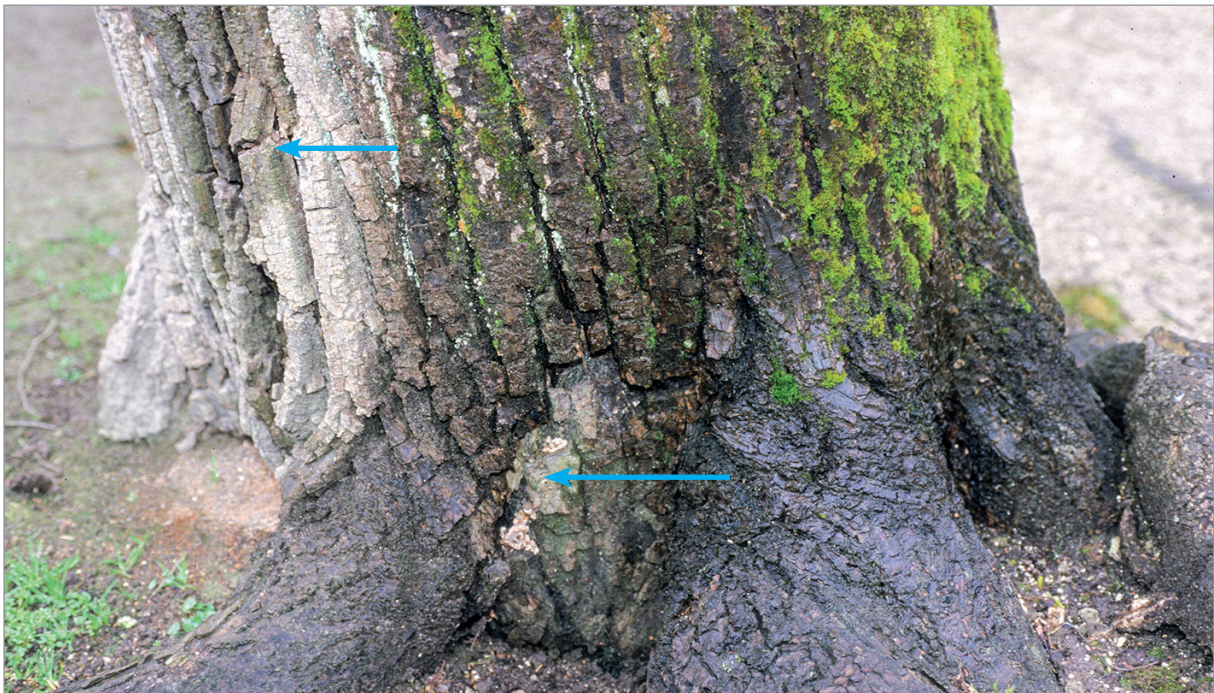


Fig.40 Tilleul sur le point de rupture.



Fig.41 Tilleul de la photo précédente.

4.7 Évolution de l'état de santé

L'évolution de l'état de santé ne suit pas forcément une trajectoire linéaire comme 1 en Fig.42, mais fluctuante comme 2 en Fig.42. La Fig.42 montre

l'évolution hypothétique de quatre arbres tout au long de leur vie. Le but d'un diagnostic est, en fait, de positionner l'arbre en question sur le graphique.

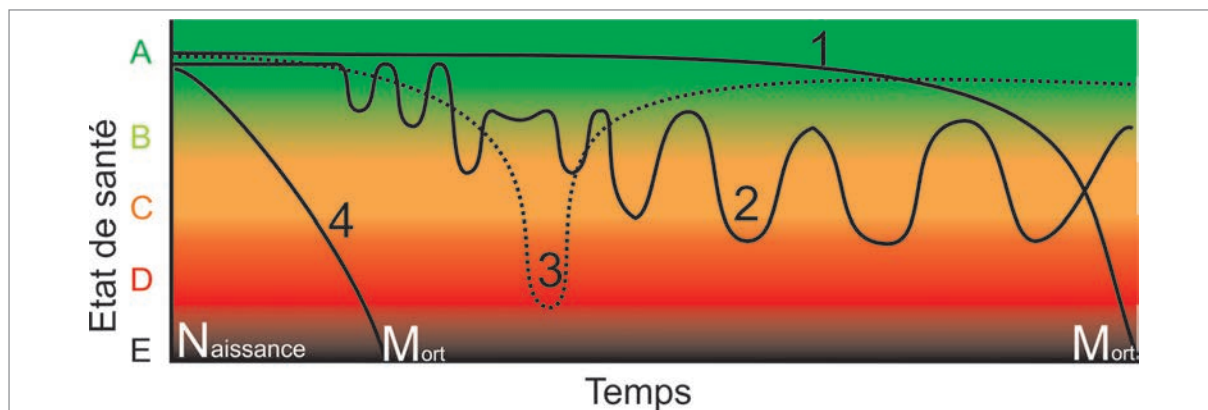


Fig.42 Évolution de l'état de santé.

Les quatre courbes montrent l'évolution de la santé de quatre arbres hypothétiques tout au long de leur vie :

1. L'arbre vit longtemps et meurt rapidement à la suite d'une longue vie. Fig. 43 et Fig. 44.
2. L'arbre vit, sa santé fluctue selon l'intensité du stress rencontré. Fig. 45
3. L'arbre vit longtemps, à un moment donné, un fort stress a amené l'arbre près de la mort, cependant, un changement dans son environnement a rayé le stress et l'arbre (étant un système générateur), a pu rétablir une santé correcte. Fig. 46 et Fig. 47
4. L'arbre meurt rapidement face à des stress intervenus tôt dans sa vie. Fig. 48



Fig.43 Le chêne « Jupiter » à la forêt de Fontainebleau. Le chêne est très vieux, il meurt subitement par suite d'un stress hydrique, lié probablement à de mauvaises conditions édaphiques (piétinement).



Fig.44 Vieux platane mutilé. Le platane est très vieux, il meurt subitement par suite d'un stress physiologique sévère, mutilation couplée aux travaux d'aménagement.



Fig.45 Ancienne trogne au château de Windsor. Le chêne est extrêmement vieux. Les stress successifs enclenchent des descentes de cimes et une migration de la Zone I vers le bas. Il y a des périodes de régression de la Zone I, suivies par des périodes d'expansion de la Zone I. L'arbre est dans le processus de « croissance vers le bas ». Il peut vivre encore très longtemps.



Fig.46 Chêne pédonculé après un stress hydrique aigu.

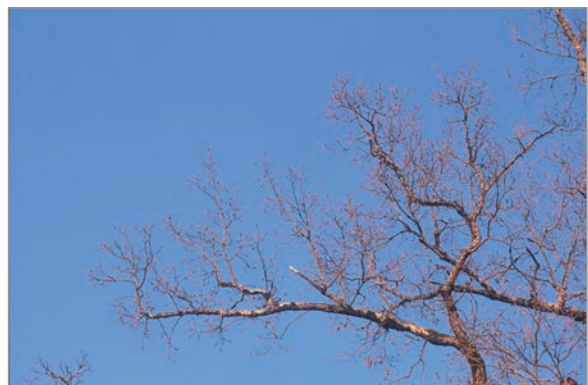


Fig.47 Production de suppléants vigoureux.

Fig.46 et 47. Ce chêne avait perdu l'ensemble de ces feuilles à la suite d'un stress hydrique sévère, la périphérie de la Zone I se desséchait, le propriétaire croyait son arbre mort. A ce moment, l'arbre est dans un état délicat, un deuxième stress pourrait entraîner la mort. Cependant, de petits rejets (syn. réitération traumatique, suppléants), se sont produits à partir des réserves d'amidon. Les rejets se développent et une nouvelle Zone I est formée : **Fig.47**, la Zone I, 8 ans plus tard.



Fig.48 Jeune chêne dépérissant.

L'arbre rentre dans une phase de dépérissement très tôt dans sa vie à la suite des dégâts occasionnés aux racines. Des rejets peu vigoureux sont produits mais ne se développent pas. Son avenir est très douteux catégorie 1 sont maintenus pour la durée vie de l'arbre. Les autres sont perdues à plus au moins long terme.

4.7.1 La réversibilité de l'état de santé

L'état de santé d'un arbre peut être amélioré soit par des processus naturels, soit par l'application d'un traitement.

4.7.2 Réversibilité naturelle

Comme nous l'avons vu, des processus naturels peuvent améliorer l'état de santé d'un arbre. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne l'état physiologique. Par exemple, un stress hydrique ponctuel ou une défoliation ponctuelle. L'amélioration de l'état mécanique peut s'effectuer par une amélioration de l'état physiologique. Parfois on peut voir de « l'auto-haubanage » : une fourche présentant une déformation anatomique, écorce incluse par exemple, est consolidée par la soudure d'une branche plus haute reliant les deux troncs entre eux.

4.7.3 Réversibilité par traitement

Des traitements divers peuvent être employés pour l'amélioration de l'état physiologique d'un arbre par exemple : taille sanitaire, mulching et traitements du sol. La possibilité d'amélioration peut être jaugée à partir de l'état actuel de l'arbre. Un mauvais état mécanique est parfois réversible par consolidation des pièces défectueuses (renforts, haubanage, étayage) parfois, en diminuant la charge de travail (réduction du volume du houppier). Il est toujours possible d'améliorer l'état mécanique par intervention d'élagage sévère. Cependant, l'effet sur l'état physiologique est néfaste.

5 ÉCHELLES POUR L'ÉVALUATION DU BOIS MORT

La présence du bois mort est liée, de manière générale, soit à l'élagage naturel soit au dépérissement de l'arbre.

5.1 L'élagage naturel

La plupart des ramifications nées sur l'arbre dépérissant, meurent et sont, dans la plupart des cas, élaguées par l'action des micro-organismes. Ceci est un processus physiologique normal que nous appelons « l'élagage naturel », et est caractéristique de tous les arbres même en parfait état de santé.

5.2 Le dépérissement

Lorsqu'un arbre, ou une partie de l'arbre entre dans une phase de dépérissement à la suite des stress environnementaux importants, des branches de la Zone I peuvent entrer en déclin et commencent à mourir. Une descente de cime ou un dessèchement est ainsi déclenché.

5.3 Le bois mort n'est pas un défaut mécanique

La présence du bois mort ne rentre pas en ligne de compte dans l'état mécanique de l'arbre car celui-ci ne fait plus partie du système vivant (directement au moins) et ne constitue pas un risque pour l'arbre en soi. Cependant, la présence du bois mort est importante pour plusieurs raisons :

- Le bois mort est souvent destiné à être élagué par des processus naturels et parfois menace la sécurité de l'homme et de ses biens.
- Le bois mort est un indicateur de l'état de santé de l'arbre : le bois mort est-il lié à des processus d'élagage naturel ? Où résulte-t-il de stress physiologiques sévères (par exemple dans le cas d'une descente de cime).

- Le bois mort a un rôle considérable à jouer lorsque la conservation de la flore et de la faune locales est pris en compte.

5.4 Le profil du bois mort

Pour ces raisons, il est parfois nécessaire d'évaluer le profil du bois mort d'un arbre ou d'un ensemble d'arbres. Le profil du bois mort permet de décrire la présence de celui-ci des points de vue qualitatif, quantitatif et de menace de chute :

- Qualitatif : quelles sont les causes de la présence du bois mort ? Quelles sont les dimensions du bois mort (s'agit-il des branches de la Zone I, de la charpente ou du tronc ?).
- Quantitatif : combien de ramifications sont mortes ?
- Menace : le bois mort menace-t-il de tomber ? Le problème de chute du bois mort est toujours réversible (élagage).

L'établissement d'un profil du bois mort est parfois essentiel :

1. Lorsqu'il est nécessaire de cibler les arbres importants pour la gestion de la flore et de la faune locale
2. Lors de la préparation des ordres de priorité d'intervention pour le plan de travail : les arbres présentant des cibles sensibles et présentant les plus grandes ramifications mortes couplées à une menace de chute peuvent être entretenus en premier lieu. Ceci est particulièrement important lorsqu'il s'agit de la gestion d'un grand nombre d'arbres.

La **Fig.49** montre une classification quantitative et qualitative du bois mort en fonction du nombre de ramifications mortes et de leur diamètre. Nous aborderons le problème des risques dans la partie DIA III.

ZONE I Notes 0 à 5		Charpente Notes 0 à 5		Tronc Notes 0 à 5 (>3 à 5 cas de multiples troncs)	
0	Pas de bois mort	0	Pas de charpentièrte morte.	0	Pas de tronc mort
1	1 à 5 branches mortes	1	1 charpentièrte morte	1	1 tronc mort
2	6 à 10 branches mortes	2	2 charpentièrtes mortes	2	2 troncs morts
3	Encombré de bois mort	3	> 3 charpentièrtes mortes	3	3 troncs morts
4	Zone I mort	4	Charpente morte	4	> 4 troncs morts

Fig.49 Bois mort : description quantitative et qualitative.

6 CONCLUSION

Dans cette deuxième partie de la méthode DIA nous avons établi des échelles pour l'évaluation de l'état de santé d'un arbre étape par étape à partir des définitions des termes stress, vigueur, vitalité et santé, mots souvent épineux à cause des multiples façons de les utiliser. Ces définitions ne plairont peut-être pas à tout le monde et feront sans doute l'objet d'une polémique éternelle.

Le praticien a besoin de pragmatisme et les définitions et les échelles ont été créées dans ce contexte, c'est-à-dire comme un outil de travail qui permet une approche pour le diagnostic d'un arbre ou d'un ensemble d'arbres.

D'autre part, les échelles présentées, présentant cinq gradations qui sont conformes aux autres indices de risque : météo, avalanches, séismes par exemple sur lesquels nous trouvons les mêmes types de gradation.

Dans la prochaine partie, nous utilisons ces échelles dans des cas concrets : méthodologie de diagnostic, la fiche individuelle de l'arbre, élaboration d'inventaires, présentation des résultats, analyse de données et élaboration d'un programme de travail.

Remerciements

Pour la lecture de la partie II en 2002 :
Catherine Coutand, INRAE.

Pour la lecture de la partie II 2023/2024 :
Christophe Dangles, Chef du Service Arbres et Forêts, Mairie de Bordeaux.

Gilles Galopin, Université d'Angers.

Darroch Moore, Atelier de l'Arbre.

Sébastien Painchaud, expert indépendant, gérant Arbo Étude Sarl.

Laura Truffaut, Responsable cellule expertise et diagnostic arboricole, Mairie de Bordeaux.

7 RÉFÉRENCES

- Blanchard, R. O., Shortle, W.C., et al. (1983). "Mechanism relating cambial electrical resistance to periodic growth rate of balsam fir." *Canadian Journal of Forest Research* 13 : 472-80.
- Bory G., Clair-Maczulajtys D., (1994), Rapport de synthèse des activités du laboratoire de physiologie de l'arbre. Université de Paris VII.
- Caraglio, Y., (1994 - 2024) Atelier de l'Arbre. Atelier « Architecture, ontogénèse, taille ».
- Cruziat, P. 2001. Comment la sève monte-t-elle jusque au faite des arbres ? Arbres et Sciences Vol I, N° 3.
- Davis, W., W. Shortle, et al. (1980). "Potential hazard rating system for fir stands infested with budworm using cambial electrical resistance." *Canadian Journal of Forest Research* 10: 541-44.
- Drénou, C., Caraglio, Y., (2019). Les principales définitions de la méthode Archi. *Forêt-entreprise* - N° 246 - mai - juin 2019.
- Drénou C., (2021), La taille des arbres d'ornement. Deuxième édition. IDF. 320 p.
- Fanget, G. (1998). Etude méthodologique d'appréciation détaillée des symptômes de dommages forestiers sur des placettes de suivi des écosystèmes forestiers et sur quelques massifs déperissants, pour trois essences feuillues (le chêne sessile, le chêne pédonculé et le hêtre). FIF-ENGREF.
- Garrec, J. P., C. Heymes, et al. (1989). "Étude de la résistance électrique du cambium dans les épicéas (*Picea abies* L.) déperissant." *Ann. Sci. For.* 46 : 373-85.
- Glomb, V. (1996). "Differences in electric impedance in healthy trees adjacent to intentionally damaged trees." *Lestnictví-Forestry* 42(9) : 427-430.
- Glomb, V., J. Sequens, et al. (1994). "Experience of measuring relative vitality of trees by electrical resistance method." *Lestnictví-Forestry* 40(12) : 537-549.
- Jacobs MR., 1939. A study of the effect of sway on trees. *Aust. Comm. For. Bur. Bull.*, 26.
- Jacobs MR., 1954. The effect of wind sway on the form and development of *Pinus radiata* D. Don. *Aust. J. Bot.* 2:35.
- Kramer, P. J., 1980. Drought, stress, and the origin of adaptations. Pages 7-20 in Turner, N. C. and P. J. Kramer : *Adaptations of Plants to Water and High Temperature Stress*. John Wiley and Sons, New York.
- Lonsdale, D. (1999). Principles of tree hazard assessment and management. *Research for Amenity Trees* N° 7, The Stationery Office, London, 388 pp.
- MacDougall, R. G., D. A. Maclean, et al. (1988). "The use of electrical capacitance to determine growth and vigor of spruce and fir trees and stands in New Brunswick." *Canadian Journal of Forest Research* 18: 587-94.
- Mattheck C., Breloer H., (1994), The body language of trees. A handbook for failure analysis. *Research for amenity trees* n° 4. 239 p. HMSO.
- Mattheck C., Kubler H., (1995), Wood - The internal optimisation of trees. Springer Verlag, 129 p.
- Mattheck, C., K. Bethge, et al. (2003). "Un nouveau critère d'évaluation du risque d'échec chez des arbres isolés sans pourriture." *Arbres et Sciences* (8) : 67-80.
- Mattheck, C., (2015). The Body Language of Trees. *Encyclopedia of Visual Tree assesement*. 548 p.
- Moore, W. (1998). Outillage pour la détection des défauts internes des arbres : le point de vue du praticien, résultats de 14 ans d'expérience. 2^{ème} partie. *La Forêt Privée*. : 23-39.
- Moore, W. (2000). "Utilisation combinée du Résistographe et du Vitalomètre pour le diagnostic et la cartographie des organes ligneux des arbres." *Arbres et Sciences* I(2) : 31-44.

- Moore, W., 2004. Appréciation des méthodes pour l'évaluation de l'état mécanique de l'arbre. Le point de vue de l'utilisateur. Arbres et Sciences Vol I, N° 11.
- Nageleisen, L.M. (1996). Méthode d'évaluation de l'aspect du houppier. Département de la Santé des forêts.
- Regnard, Lauri et Moore. (2002). Thésaurus de termes de morphologie et morphogènes des arbres. Arbres et Sciences volume II- N° 6.
- Rinn, F., (2018). The one third rule. Tree Matters. The quarterly magazine of the New Zealand Arboricultural Association Inc. Edition 74, Winter 2018. ISSN 1174-4715.
- Rinn, F., (2021). A Concept for Tree Stem Breakage, Safety Assessment and Evaluation by Self-referencing. <http://www.rinntech.com> Also in French.
- Roloff, A. (1991). Crown morphology as a tool to determine tree vitality. L'Arbre. Biologie et Développement. Montpellier, Naturalia Monspelienis. n° h.s. A7 : 115-26.
- Salisbury, F. B. and C. W. Ross (1985). Plant Physiology, Wadsworth, Inc. 540 p
- Sellin, A. (1994). "Sapwood-Heartwood proportion related to tree diameter, age, and growth rate in *Picea abies*." Canadian Journal of Forest Research 24 : 1022-28.
- Shigo, A. L. (1986A). A new tree biology:, Shigo and Trees, Associates : 113, 188, 558, 593.
- Shigo, A. L. (1986B). A new tree biology dictionary : Shigo and Trees, Associates.
- Shigo, A. L. (1991). Modern arboriculture: a systems approach to the care of trees and their associates, Shigo and Trees, Associates : 367-378.
- Stepine, P. (1986). Résistance des matériaux. Editions Mir, Moscou. 277 p.
- Strouts, R. G. and T. G. Winter (1994). Diagnosis of ill-health in trees, HMSO.
- Tattar, T. A. (1989). Diseases of Shade Trees. San Diego, Academic Press, Inc.
- Wargo, P.M. (1975b). Estimating starch content in roots of deciduous trees – a visual technique. USDA Forest service research paper NE-313.
- Wargo, P.M. (1988). Judging vigor of deciduous hardwoods. Agricultural N° 418.
- Wesolly, L., Erb. M. (1998). Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle. Patzer verlag.
- Wesolly, L., Erb. M. (2016). Manual of Tree Static and Inspection. Patzer Verlag. 288 pp.