

Le diagnostic architectural : un outil d'évaluation des sapinières dépérissantes

par Christophe DRÉNOU, Flore GIRAUD, Herminie GRAVIER,
Sylvie SABATIER et Yves CARAGLIO

***L'observation des arbres
est un acte de gestion en soi.
Dans cet article, les auteurs
proposent un outil de diagnostic
visuel appliqué au sapin pectiné,
permettant de juger à la fois
les symptômes de dégradation
du houppier et les processus
de résilience. Les gestionnaires
forestiers peuvent, avec cet outil,
juger convenablement de l'état
de l'arbre et notamment
du caractère inéluctable ou pas
du dépérissement et prendre ainsi
les décisions de gestion
qui conviennent le mieux
à leurs objectifs.***

Comment repérer les sapins d'un peuplement mieux à même de réagir à un stress ? Comment distinguer précocement le caractère réversible ou irréversible d'un dépérissement ? Un outil de diagnostic visuel basé sur l'analyse architecturale des arbres, nommé méthode ARCHI, est proposé.

Introduction

Le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) est une gymnosperme appartenant à la famille des Pinaceae. Il est présent à l'état naturel uniquement en Europe et est typique de l'étage montagnard inférieur, entre 400 et 1800 m d'altitude (RAMEAU *et al.*, 1989 ; AUSSENAC, 2002). En France, le sapin pectiné est la deuxième espèce de conifères après l'épicéa commun en termes de biomasse. Son bois est de bonne qualité (75% est utilisé pour les charpentes ou la menuiserie courante, 24% sert à l'industrie ou au chauffage et les 1% restants vont à l'ébénisterie et à la menuiserie fine, CAILLERET, 2011).

Un dépérissement est un phénomène évoluant au cours du temps et traduisant une détérioration de la santé d'un arbre (mortalité de branches, réduction de la croissance, feuillage anormal...). Si la situation parfois semble inquiétante, l'expérience montre qu'un dépérissement n'entraîne pas systématiquement la mortalité de l'individu. Il ne suppose pas de causes particulières, contrairement aux maladies provoquées par un seul agent biotique ou abiotique. Ainsi, dans le terme « dépérissement » émane l'idée d'une cause non identifiée ou non immédiatement identifiable avec certitude (DELATOUR, 1990 ; ASSE, 2012).

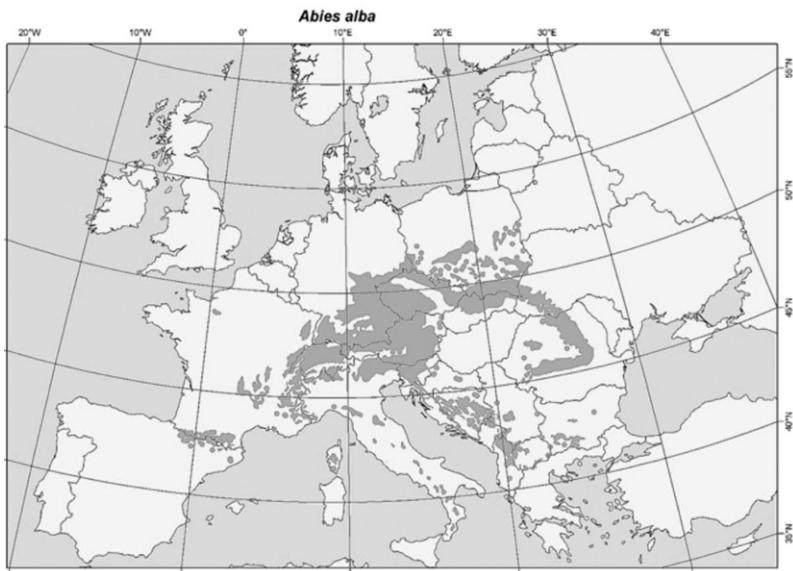


Fig. 1 :
Aire de répartition
du sapin pectiné,
Carte issue du site
EUFORGEN

En région méditerranéenne, le sapin pectiné se trouve dans la limite sud de son aire de répartition et, depuis 2003, des dépréisements sont observés en Languedoc-Roussillon, dans le département de l'Aude et en Provence-Alpes-Côte d'Azur (ASSE, 2012, CAILLERET 2011). Pour cette dernière, en particulier dans les Alpes-de-Haute Provence (la vallée de l'Issole) et dans le Vaucluse (le Mont Ventoux), les dépréisements touchent principalement les peuplements sur forte pente, de basse altitude, sur versant nord et sur sol superficiel (CAILLERET et DAVI, 2010, NOURTIER, 2011). Dans l'Aude, sur le plateau de Sault, ce sont les peuplements d'altitude inférieure à 1 000 m, exposés au sud et sur les crêtes qui sont les plus touchés (BOUTTE et GIRARD, 2008).

Les critères visuels les plus utilisés pour évaluer le dépréissement d'un résineux sont : la coloration anormale du feuillage, le déficit foliaire et la mortalité des branches (NAGELEISEN, 2012 ; AUMONIER *et al.*, 2006). Leur suivi au cours du temps sert à surveiller la santé des forêts françaises et, dans ce but, des réseaux d'observation ont été mis en place par le Département de la Santé des Forêts (ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire, BOUTTE, 2011).

L'étude de l'architecture des plantes a commencé dans les années 1970, avec les travaux précurseurs de Hallé et Oldeman (HALLÉ et OLDEMAN, 1970). Cette discipline scientifique est présentée de manière complète dans BARTHÉLÉMY et CARAGLIO (2007) ainsi que dans MILLET (2012).

* Cf. lexique page 97

L'architecture d'une plante repose sur la nature et l'agencement relatif de chacune de ses parties. Elle est l'expression d'un équilibre entre les processus endogènes de croissance et les contraintes exogènes exercées par l'environnement (NICOLINI & CARAGLIO, 1994, NICOLINI *et al.*, 2003, BARTHÉLÉMY et CARAGLIO 2007). L'objectif principal d'une analyse architecturale est de reconstituer la dynamique de développement d'une plante depuis la germination jusqu'à la sénescence (ontogénèse). Après une description de l'ensemble des formes que l'on peut observer à un moment donné chez une espèce, la reconstitution dynamique du développement se fait généralement par comparaison d'individus à des stades de développement différents (méthode synchronique). Pour complément et validation, chaque individu peut faire l'objet d'une analyse rétrospective sur la base de différents marqueurs de croissance (largeur des cernes, longueurs des pousses annuelles, apparition de gourmands..., méthode diachronique historique, TAUGOURDEAU *et al.* 2012).

L'architecture, en nous renseignant sur les séquences de développement propres à chaque espèce, ainsi que sur les écarts à la normale provoqués par des stress, revêt une valeur diagnostique. Cette approche a été appliquée au diagnostic de l'arbre en forêt (RUTISHAUSER *et al.* 2011) et à l'analyse des impacts des facteurs de l'environnement sur la croissance et la ramification des arbres (GROSFELD *et al.* 1999, BARTHÉLÉMY *et al.* 2009, SABATIER *et al.*, 2003, HEURET *et al.*, 2003).

Ontogénèse du sapin pectiné

L'ontogénèse du genre *Abies* a fait l'objet de plusieurs travaux (EDELIN, 1977 pour *Abies nordmanniana* Spach ; DEMERS, 1994 pour *Abies balsamea* L. Mill. ; TAUGOURDEAU, 2011 pour *Abies alba* Mill.). Elle peut se décomposer en trois étapes.

L'arbre jeune

Le jeune sapin pectiné est conforme au modèle architectural dit « de Massart » : tronc orthotrope* à croissance monopodiale, ramification rythmique acrotone, axes latéraux plagiotropes à croissance monopodiale, floraison latérale (HALLÉ *et al.*, 1978). L'ensemble des axes peut être réparti en cinq catégories. Celles-ci sont agencées de

manière ordonnée au sein de la structure et apparaissent selon une séquence précise au cours du développement du jeune arbre. L'axe issu de la graine est dénommé axe d'ordre 1, il porte des axes d'ordre 2 qui se ramiifient en produisant des axes d'ordre 3, et ainsi de suite. La distinction entre les cinq ordres de ramification se fait sur la base de critères morphologiques, mais les fonctions de chaque catégorie diffèrent également. L'A1 est l'organe d'exploration verticale du milieu, les A2 explorent horizontalement l'espace, les A3 ont un rôle essentiellement d'interception de la lumière, et les axes A4 portent la sexualité mâle. Les axes d'ordre 5 sont peu nombreux, de petite taille et ne portent pas de sexualité. Deux types de ramification coexistent sur les axes A1, A2 et A3. Une ramification pseudo-verticillaire située à l'extrémité des pousses annuelles, et une ramification inter-verticillaire répartie le long des pousses. La première est à l'origine des étages de branches bien marqués le long du tronc qui permettent de calculer l'âge d'un jeune sapin. Le deuxième mode de ramification produit des axes moins développés intercalés entre les pseudo-verticilles précédents.

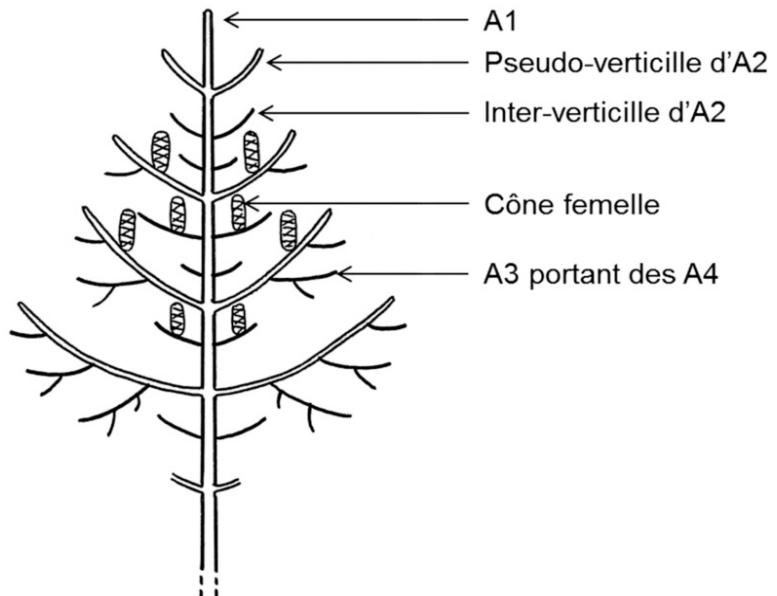
Les caractéristiques de l'arbre jeune sont intégrées dans un tableau nommé « unité architecturale ».

L'arbre adulte

Les branches pseudo-verticillaires des quatre ou cinq étages sommitaux d'un arbre adulte sont identiques à celles de l'unité architecturale. En revanche, les A2 pseudo-verticillaires sous-jacents présentent des fourches à leur extrémité. Ce trait morphologique est le résultat d'un processus de réitération partielle. Le sapin pectiné a en effet l'aptitude de réitérer une partie de son architecture, les axes A2, par allongement et transformation de ses A3. Ce mécanisme, couplé à la ramification inter-verticillaire, est un moyen pour le sapin de densifier son feuillage. Chez l'arbre adulte d'ailleurs, le tronc est entièrement ou partiellement caché par le feuillage du houppier.

Parallèlement à la réitération partielle des A2, une diminution progressive de la dominance apicale du tronc entraîne une légère perte de conicité du houppier se traduisant par un arrondissement du contour de la cime.

L'arbre adulte atteint la maturité sexuelle. Les cônes femelles sont portés par les A2 et



les A3 les plus vigoureux au sommet de la cime, tandis que les chatons mâles apparaissent sur les pousses annuelles les moins vigoureuses situées en périphérie du houppier. A noter qu'entre la zone femelle apicale et la zone mâle s'intercalent plusieurs étages de branches entièrement stériles.

Le sapin pectiné, au cours de la ramification, n'utilise pas tous les bourgeons formés à l'aisselle des aiguilles. Certains restent latents pendant plus d'une année avant de se développer. Ils restent au niveau de l'écorce et suivent la croissance secondaire de l'axe porteur. Cette attente peut durer plusieurs dizaines d'années (jusqu'à 35 années au moins selon TAUGOURDEAU, 2011). Quand les

Fig. 2 :
Schéma de l'extrémité d'un jeune sapin. Les A5 ne sont pas représentés.
Dessin original : Ch. Drénou

Tab. I :
Description de l'unité architecturale du sapin pectiné.
D'après TAUGOURDEAU, 2011

	A1	A2	A3	A4	A5
Direction de croissance	orthotrope			plagiotope	
Phyllotaxie et symétrie	phyllotaxie spiralée et symétrie radiale		phyllotaxie spiralée avec disposition bilatérale des feuilles par torsion des pétioles		
Ramification pseudo-verticillaire	oui	oui	oui	oui	non
Ramification inter-verticillaire	oui	oui	oui	non	non
Sexualité	stérile	femelle et mâle	femelle et mâle	mâle	stérile
Durée de croissance	indéfinie	plusieurs dizaines d'années	10 à 15 ans	5 à 10 ans	1 à 5 ans
Durée de vie des feuilles	6 à 10 ans	11 à 13 ans	10 à 14 ans	même durée que celle des axes A4	même durée que celle des axes A5

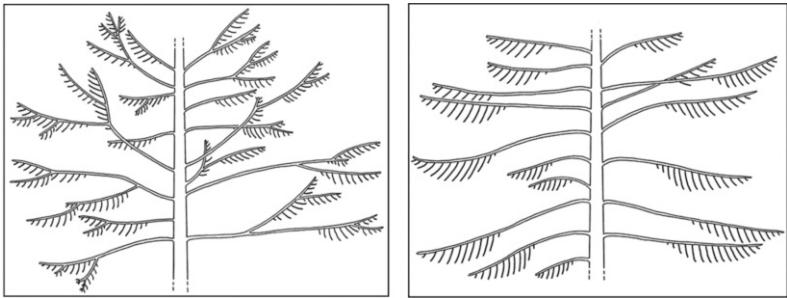


Fig. 3 :
Représentation schématique de branches de sapin réitérées (à gauche) et non réitérées (à droite).

Dessins originaux :
Ch. Drénou

Fig. 4 :
Evolution du contour du houppier et de la répartition de la sexualité au cours de l'ontogénèse du sapin pectiné. De gauche à droite : arbre jeune, adulte et sénescents.
Blanc : zone végétative.
Gris foncé : zone femelle.
Gris clair : zone mâle.
Schémas : Ch. Drénou.

bourgeons latents entrent en activité, ils donnent naissance à des structures nommées gourmands ou axes épicorniques. Les *Abies* sont connus pour mettre en place des gourmands lorsqu'ils vieillissent (ISHII *et al.*, 2007 ; KENNEDY *et al.*, 2009). Ils permettent aux axes A2 âgés, dont les A4 et les A3 finissent par mourir, de se regarnir en feuillage.

L'arbre sénescant

Au cours de la sénescence, on constate une réduction de croissance des pousses annuelles gagnant progressivement toutes les catégories d'axes, y compris les A2 pseudo-verticillaires et l'A1. Les conséquences sont de trois ordres.

Tout d'abord, l'homogénéisation des pousses annuelles dans tout l'arbre conduit à la présence simultanée de la sexualité mâle et femelle au sommet du houppier. La transition stérile séparant les zones mâle et femelle, caractéristique de l'arbre adulte, n'existe donc plus. Ensuite, la croissance ralentie, voire arrêtée du tronc, parfois accompagnée d'une courbure apicale, engendre un aplatissement marqué de la cime,

couramment appelé « table » par les forestiers. Enfin, comme sur d'autres essences, les sujets sénescents perdent l'aptitude à produire des gourmands vigoureux (DRÉNOU, 2009).

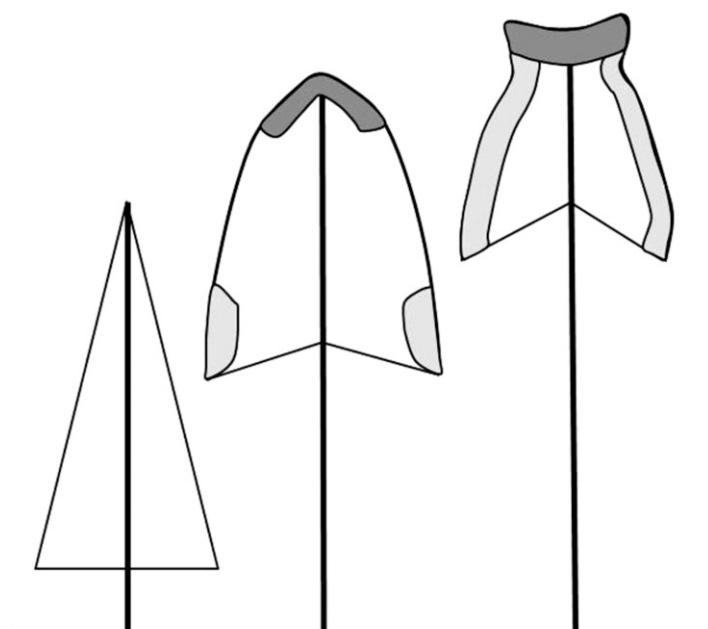
Critères architecturaux retenus pour l'observation des dépérissements du sapin pectiné

Un arbre est composé de plusieurs niveaux d'organisation : unité de croissance (ou pousse annuelle), axe ramifié, unité architecturale (ou arbre jeune, voir précédemment), arbre entier (BARTHÉLÉMY et CARAGLIO, 2007). Plus l'échelle est petite et meilleure est la précision des observations, mais plus ces dernières deviennent difficiles au fur et à mesure que l'arbre grandit. La visibilité de l'architecture devient vite problématique quand les arbres dépassent 25 mètres de hauteur et lorsqu'ils sont situés en forêts denses, surtout s'ils portent un feuillage persistant comme le sapin. Nous avons donc choisi des critères architecturaux simples, peu nombreux et facilement visibles avec une paire de jumelles (12X50). Afin de faciliter encore davantage le travail de l'observateur sur le terrain, une série de questions à réponses binaires oui/non intégrant les critères architecturaux retenus est proposée.

Les niveaux d'observation

L'arbre entier

Lorsqu'on s'intéresse au dépérissement d'une forêt, tous les arbres ne sont pas à prendre en compte. Afin de limiter les interférences entre les symptômes d'un dépérissement et ceux liés à la concurrence entre végétaux, seuls les arbres de l'étage dominant sont retenus. Les individus correspondants sont les plus hauts et présentent un houppier développé (arbres dominants), ou sont situés légèrement en dessous avec un houppier moins développé (arbres co-dominants, BASTIEN et GAUBERVILLE, 2011). L'observation d'un arbre dans sa globalité se fait idéalement à une distance au moins équivalente à sa hauteur. Par ailleurs, il est recommandé de tourner autour de l'arbre afin de choisir le meilleur angle de vision. En peuplement dense et haut, ces conditions optimales sont rarement réunies. Il convient



alors de cumuler les observations partielles réalisées depuis des emplacements différents, mais, dans les situations les plus difficiles, il est parfois nécessaire de choisir un autre arbre (NAGELEISEN *et al.*, 2010).

Le houppier notable

L'appellation « houppier notable » ou houppier hors concurrence, est utilisée par le Département de la Santé des Forêts pour désigner la partie supérieure d'un houppier située à la lumière (NAGELEISEN, 2012). Seule cette zone est retenue pour la notation des symptômes de dégradation du houppier. La prise en compte des branches basses susceptibles d'être naturellement sénescentes, mortes, cassées ou élaguées n'auraient en effet pas de sens dans l'estimation de l'état de santé d'un arbre. Le houppier notable est la partie du houppier située au-dessus de la ligne joignant les contacts latéraux avec les houppiers des arbres voisins. La part du houppier notable d'un arbre diminue avec l'augmentation de la densité d'un peuplement. Sur un arbre isolé de milieu ouvert, la totalité du houppier est notable. En forêt très dense, la part de houppier notable peut être réduite au tiers supérieur du houppier.

Le tronc

La partie du tronc portant le houppier notable est généralement masquée par le feuillage. En dessous, l'élagage naturel des branches dégarnit au contraire le tronc. Chez beaucoup d'essences, notamment le sapin pectiné, des gourmands peuvent apparaître directement sur le tronc et ceci bien après la disparition des branches. Ne pas tenir compte de ces structures vivantes, parfois vigoureuses, parfois chétives, ne donnerait qu'une vision partielle de l'état physiologique d'un arbre.

Les branches pseudo-vorticillaires (A2)

Les axes A2 pseudo-vorticillaires correspondent aux longues branches réparties par étages le long du tronc. De l'importance de leur ramification (production de rameaux A3) et de leur réitération (formation de fourches) dépend la densité du feuillage du houppier. Leur examen visuel est donc primordial. Un A2 présente une symétrie bilatérale se traduisant par une nette dorsi-ventralité. Les faces latérales et ventrales portent des A3 plus ou moins pendants selon

les individus, et, lorsque des gourmands apparaissent, ceux-ci se situent préférentiellement sur la face dorsale, ce qui permet de facilement les identifier.

La nature des observations

La mortalité

Chez les résineux, du fait de la persistance du feuillage, le symptôme de mortalité le plus évident est l'absence d'aiguilles. Des critères complémentaires peuvent s'ajouter : absence de bourgeons terminaux, ramification incomplète (absence d'axes d'ordre n+1 sur un axe d'ordre n), écorce altérée et mortalité du cambium. La mortalité survient naturellement chez les axes A4 et A5 ayant une faible durée de croissance, mais elle passe alors inaperçue. Il en est de même pour les branches basses situées à l'ombre qui arrêtent leur développement et finissent par mourir. En revanche, dès que la mortalité concerne une majorité d'A3 dans le houppier notable, le feuillage devient anormalement clairsemé. Les symptômes d'une perte de vitalité sont encore plus marqués lorsque la mortalité touche les A2 du houppier notable.

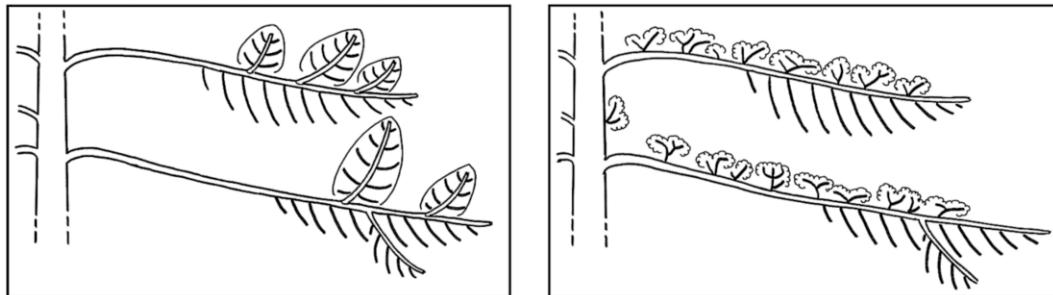
La densité du feuillage

L'observation de la densité du feuillage, comme il a été dit plus haut, donne indirectement des informations sur le développement du sapin. Le feuillage est dense et empêche la visibilité totale du tronc lorsque : le tronc porte à la fois des A2 pseudo-vorticillaires et inter-vorticillaires, les A2 forment des fourches, les A3 sont nombreux, la ramification atteint l'ordre 5 et enfin, les aiguilles sont de dimension normale. Pour caractériser l'importance d'un déficit foliaire, une note qualitative de densité ou un pourcentage indicatif peuvent être utilisés (NAGELEISEN, 2012).

Tab. II :
Notes qualitatives
d'intensité des critères
symptomatologiques
observés sur les arbres.
Nageleisen, 2012

Note	Intensité	Fréquence	Nombre	% indicatif
0	Absence	Nulle	0	0
0+ (0,5)	Très faible	Très faible	Quelques rares	1 à 5
1	Légère	Faible	Quelques à peu nombreux	6 à 25
2	Assez forte	Modérée	Assez nombreux	26 à 50
3	Forte	Importante	Nombrueux	51 à 75
3+ (3,5)	Très forte	Très importante	Très nombreux	76 à 95
4	Total	Toute la partie notée concernée	Total	96 à 100

Fig. 5 :
Représentation schématique de gourmands vigoureux de sapin (à gauche) et de gourmands chétifs (à droite).
Dessins originaux : Ch. Drénou



Les gourmands

Les 5 catégories d'axes A1 à A5 caractérisant l'architecture du sapin pectiné se développent selon une séquence temporelle prévisible et un agencement spatial précis. Les gourmands ne rentrent pas dans ce cadre. Ils apparaissent avec un décalage dans le temps et en dehors des zones habituelles de ramifications : sur le tronc, en dessous du houppier notable, sur la face dorsale des A2, ou à proximité d'un axe cassé par exemple. Un gourmand peut être orthotrope (du grec « *orthos* » : droit et de « *tropos* » : direction) lorsqu'il donne naissance à une structure identique à un jeune tronc A1 (à la suite d'un traumatisme de la flèche par exemple). Il est plagiotrope (du grec « *plagios* » : oblique) lorsqu'il produit des structures en tout point comparables aux axes latéraux.

Orthotrope ou plagiotrope, un gourmand est qualifié de vigoureux lorsqu'il présente une dominance apicale marquée (existence d'un axe principal dominant), une forte croissance (net espacement entre les étages de ramification), et une sexualité absente ou limitée à quelques cônes femelles. À l'inverse, un gourmand chétif présente un ou plusieurs caractères de vieillesse : dimension réduite, structure fourchue, table apicale, sexualité mâle abondante et/ou cônes femelles rares.

Tab. III :
Niveaux d'observation et questions posées à l'observateur.

Niveaux d'observation	Questions posées
Arbre entier	L'arbre est-il vivant (cambium vivant à 1,30 m) ? Y a-t-il des gourmands vigoureux ? Les gourmands vigoureux sont-ils nombreux ?
Houppier notable	Y a-t-il plus de 5% de mortalité ? Y a-t-il plus de 5% de feuillage à coloration anormale ? Le tronc est-il visible sur toute la longueur ? La mortalité est-elle limitée aux A3 et A4 (si non : présence d'A2 morts) ?
Tronc Axes A2	Y a-t-il formation d'un deuxième houppier ? Y a-t-il des gourmands vigoureux ? Les gourmands vigoureux sont-ils nombreux ?

Dans le houppier notable, les gourmands sont considérés comme nombreux lorsqu'ils sont présents sur plus de 50% des A2 et qu'ils recouvrent ces derniers sur plus du quart de la longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.

Les gourmands ont la capacité de former un deuxième houppier emboité sous le houppier notable ou inséré en dessous lorsqu'ils sont vigoureux, nombreux et hiérarchisés entre eux (certains étant dominants, d'autres dominés).

Le questionnaire de terrain

Les critères architecturaux retenus ont été résumés à travers une série de questions à réponses binaires oui/non. Vient s'ajouter une question supplémentaire sans rapport direct avec l'architecture : y a-t-il du feuillage à coloration anormale dans le houppier notable ?

De l'observation au diagnostic architectural : la méthode ARCHI

Aucune mesure physique ou chimique n'ayant fait ses preuves jusqu'à maintenant, c'est l'appréciation visuelle qui reste la base de tout diagnostic (ASSE, 2012).

La méthode ARCHI, comme son nom l'indique, est basée sur l'analyse de l'architecture des arbres. Elle prend en compte les deux composantes d'un dépérissement, à savoir : les symptômes de dégradation des houppiers, c'est-à-dire les écarts à la normale, et les processus de résilience, c'est-à-dire les retours à la normale (ou à un état proche de la normale). Cette méthode a été développée pour la première fois chez le chêne pédonculé (*Quercus robur L.*) (DRÉNOU *et al.*, 2011 et 2012), puis a été appliquée au sapin pectiné (GIRAUD, 2012 ; GRAVIER, 2012).

L'état normal du sapin adulte : l'arbre sain

Si le houppier notable d'un sapin adulte présente un feuillage dense, des aiguilles à coloration normale et aucune mortalité d'axe, alors il n'y a pas d'anomalie visuelle au moment de l'observation. Dans ce cas, l'arbre est jugé sans défaut et est considéré comme sain. Dans un peuplement, il sert de référence pour le diagnostic des autres individus.

Cet arbre de référence intègre à la fois les critères de normalité architecturale de l'espèce, et les variations phénotypiques locales. Hauteur totale, part du houppier notable, longueur des branches, aspect du feuillage dépendent en effet des sylvicultures et des stations. Par conséquent, même si l'architecture est identique, l'aspect visuel d'un arbre de référence peut varier selon qu'il se situe en Auvergne, sur le Mont Ventoux (Vaucluse) ou dans les Vosges.

Les écarts à la normale : les arbres stressés

Un sapin qualifié de « stressé » présente à la fois des symptômes de dégradation du houppier notable et un potentiel de restauration, sans qu'il soit possible de se prononcer sur son avenir. Deux cas de figures se rencontrent.

Les symptômes, surtout lorsqu'ils sont récents, peuvent être légers (présence de mortalité disséminée au sein d'un feuillage dense, ou mortalité limitée aux rameaux A3) sans pour autant être compensés par des gourmands.

Les symptômes sont parfois plus importants (mortalité non limitée aux A3 et feuillage clairsemé), mais la présence diffuse de gourmands vigoureux laisse supposer une possible capacité de réparation.

Dans tous les cas, pour établir un pronostic, il est nécessaire de suivre l'évolution du sapin stressé, afin de savoir lequel des deux processus, dégradation ou restauration, prend le dessus au cours du temps. Afin d'affiner le diagnostic architectural des arbres stressés, il convient de préciser le pourcentage de déficit foliaire.

Les retours à la normale : les arbres résilients et les descentes de cime

Quand la cime d'un jeune sapin en pleine croissance casse accidentellement, elle est très souvent relayée par l'émergence d'un ou

Symptômes de dégradation	Processus de restauration	Etat de l'arbre adulte & appellation
AUCUN	ABSENTS	Etat normal Arbre SAIN
LÉGERS Présence de mortalité dans le houppier notable, mais feuillage dense ; ou feuillage peu dense, mais mortalité limitée aux A3	ABSENTS ou FAIBLES Absence de gourmands vigoureux ; ou gourmands vigoureux peu nombreux PRÉPONDÉRANTS sur les A2 Présence de gourmands vigoureux et nombreux	Ecart à la normale Arbre STRESSÉ Retour à la normale Arbre RÉSILIENT
IMPORTANTS Feuillage peu dense et mortalité non limitée aux A3	ABSENTS ou FAIBLES Absence de gourmands vigoureux ; ou gourmands vigoureux peu nombreux PRESENTS mais DIFFUS Présence de gourmands vigoureux et nombreux, mais non hiérarchisés et diffus dans l'arbre entier PRÉPONDÉRANTS sur le tronc Présence de gourmands vigoureux, nombreux et hiérarchisés (formation d'un deuxième houppier)	Point de non-retour à la normale Arbre en DÉPÉRISSEMENT IRRÉVERSIBLE Ecart à la normale Arbre STRESSÉ Retour à un état proche de la normale Arbre en DESCENTE de CIME

plusieurs gourmands orthotropes. Ce phénomène de résilience peut également survenir après un stress. Si une grande partie des rameaux A3 est touchée par la mortalité, la face dorsale des A2 a la capacité de se recouvrir de vigoureux gourmands plagiotropes. Ceux-ci, en se développant, finissent par remplacer les A3 dépérissants et permettent à l'arbre de reconstituer le houppier d'origine.

Lorsque la totalité du houppier est fortement endommagée par un dépérissement, un deuxième houppier produit par des gourmands se met parfois en place. Ces cas de descente de cime donnent au sapin l'opportunité de revenir à une situation proche de la normale, mais avec une hauteur moindre et des risques de dégradation sanitaire du tronc.

Les points de non-retour à la normale : les dépérissements irréversibles

Quand les symptômes de dégradation sont importants et que les processus de restauration sont inexistant ou négligeables, l'équilibre est rompu, la situation de dépérissement se bloque irréversiblement. Avec un feuillage se raréfiant et un envahissement par la mor-

Tab. IV :
Typologie des états du sapin pectiné selon l'ampleur des symptômes de dégradation du houppier et selon l'importance des processus de restauration architecturale.

talité, l'arbre, même s'il peut parfois survivre plusieurs années, est sans avenir. C'est encore une fois l'observation attentive des gourmands qui l'atteste avec quatre critères principaux : l'absence (ou le nombre restreint) de gourmands vigoureux, l'abondance de gourmands chétifs présentant des caractères de vieillesse (dimensions réduites, structures fourchues, table apicale, abondance de la sexualité mâle et rareté des cônes femelles), la distribution diffuse de ces petits gourmands (par opposition à la répartition généralement localisée des gourmands vigoureux), et enfin, la similitude de ces gourmands quelle que soit leur hauteur d'insertion dans l'arbre (contrairement aux gourmands vigoureux dont la vigueur est souvent croissante de la cime vers la base du tronc).

Fig. 6 :
Illustration de quatre états sanitaires chez le sapin pectiné. Sain (6a), stressé (6b), résilient (6c) et dépérissement irréversible (6d).
Schémas et photos : Ch. Drénou.

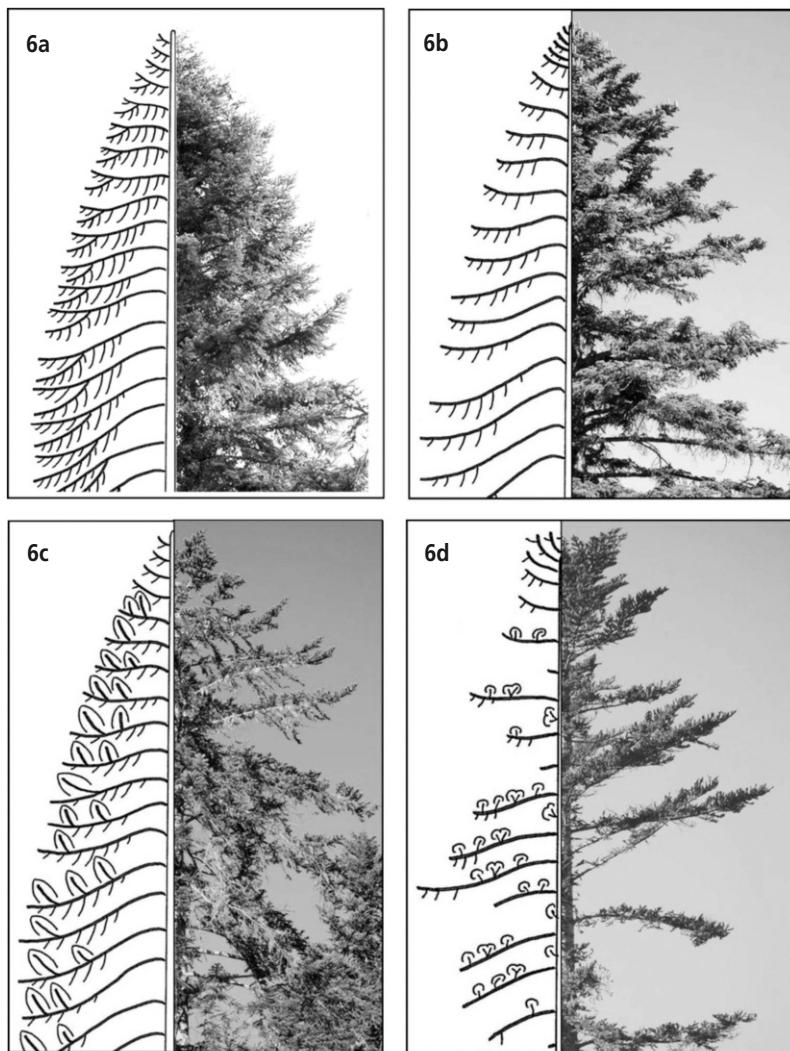
La clé de diagnostic ARCHI

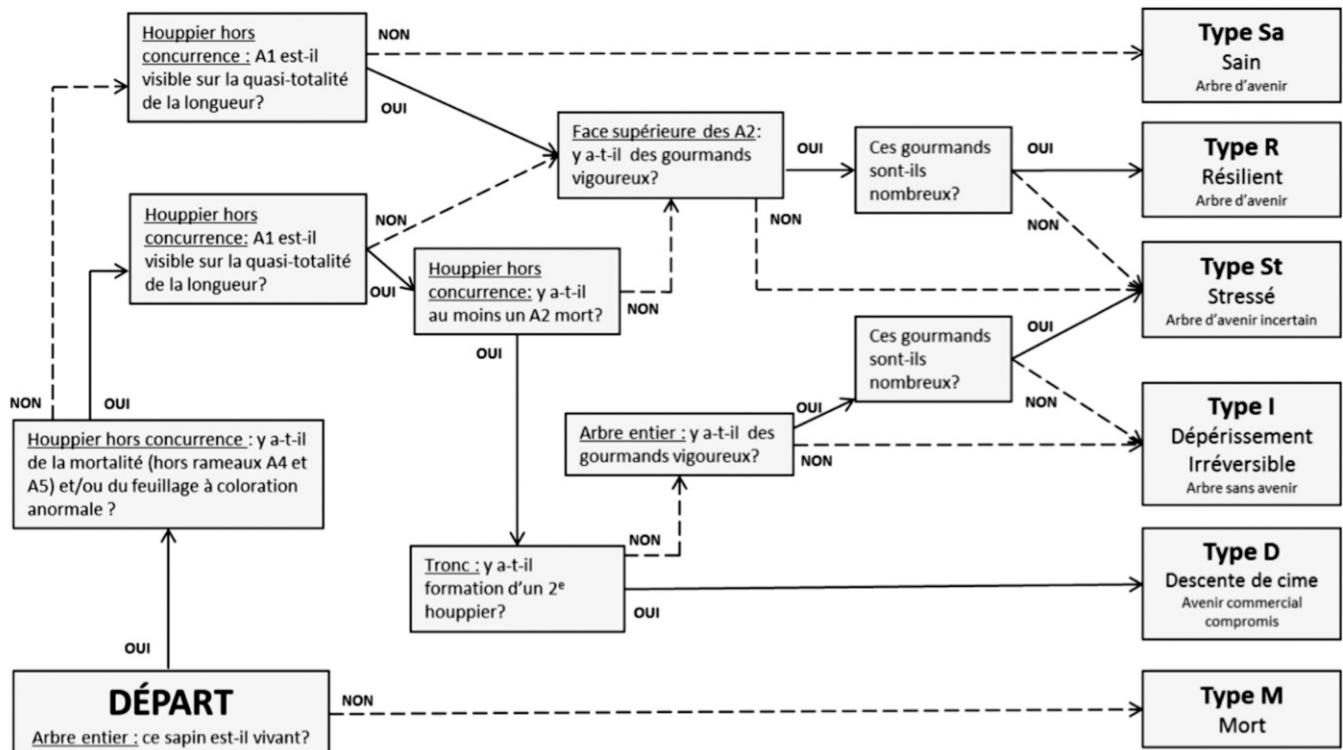
Afin de faciliter les démarches de diagnostic sur le terrain, une clé de détermination

des types architecturaux a été mise en place. Elle reprend l'ensemble des observations nécessaires sous forme de questions à réponse binaire oui/non, et conduit l'utilisateur vers une des six sorties possibles. Les abréviations suivantes sont proposées pour l'encodage des résultats : Sa (sain), R (résilient), St (stressé), I (dépérissement irréversible), D (descente de cime) et M (mort).

Discussion et conclusion

La vulnérabilité d'un arbre intègre son niveau de résistance (capacité à résister à un événement climatique extrême) et son aptitude à la résilience (capacité à retrouver une vitalité proche de celle qu'il avait avant un événement climatique extrême, CAILLERET, 2011). Si des critères existent pour mesurer la résistance à la sécheresse, tel le P50 par exemple (potentiel hydrique provoquant une perte de 50% de conductivité des organes transportant la sève brute), la caractérisation de la résilience reste encore un sujet d'étude insuffisamment exploré. Des hypothèses sont formulées sur les changements d'allocation du carbone après une sécheresse intense : l'arbre investit-il dans les racines, la reproduction, la croissance radiale, la reconstitution de réserves carbonées, les systèmes de défense contre les pathogènes (CAILLERET, 2011) ? Sans apporter de réponse directe, la méthode ARCHI montre clairement que les arbres utilisent le carbone, au moins en partie, pour produire des gourmands, et l'observation attentive de ces derniers revêt une véritable valeur diagnostique. Plusieurs indicateurs de résilience sont ainsi utilisables : les délais d'apparition des gourmands (l'année même d'une sécheresse, l'année d'après ou ultérieurement), leur nombre, leur répartition dans l'arbre (localisée ou diffuse sur les rameaux, branches et/ou tronc), leur niveau de hiérarchie (présence ou absence de dominance) et leur âge ontogénique (jeune, adulte ou sénescent). Les rôles physiologiques des gourmands méritent d'être étudiés. Les gourmands en produisant de nouvelles feuilles réactivent-ils la transpiration, moteur de la circulation hydrique ? L'initiation de nouveaux vaisseaux de bois par les gourmands permet-elle de contourner les tissus embolisés après une forte canicule ? Autant de questions soulevées par la méthode ARCHI et posées à la recherche.





Prendre en compte la résilience des arbres, c'est juger moins sévèrement la symptomatologie des déprésissements. Chez le Douglas par exemple, le critère « déficit foliaire », pris isolément, tend à surestimer le déprésissement des Douglas. En effet, tant qu'un arbre ne présente pas au moins 60% de déficit foliaire, sa croissance radiale reste identique à celle d'un sujet sans déficit foliaire (SERGENT, 2011). Le critère « mortalité des branches » est sans doute lui aussi trop sévère. Ainsi, les sapins pectinés dont le houppier comporte des branches mortes n'ont pas tous nécessairement de plus faibles taux de croissance et une plus forte probabilité de mourir que les arbres sains (CAILLERET, 2011). Ces deux études récentes, en ne prenant pas en compte les gourmands dans le diagnostic, se sont privées d'informations susceptibles d'expliquer des résultats apparemment paradoxaux. Ce constat rejoint ce que BECKER et LÉVY écrivaient déjà en 1983 : « *La présence et l'abondance des branches mortes chez les chênes peut être trompeuse, et il est fréquent de surestimer la gravité d'un déprésissement d'un arbre, alors que l'inverse ne se produit jamais.* ».

80 à 90% de la variabilité génétique présente chez une espèce forestière se trouve entre individus d'une même population, le reste se retrouvant entre les différentes populations de l'aire de répartition de l'espèce (FADY, 2011). L'application de la méthode ARCHI met en lumière cette diversité génétique directement sur le terrain. En effet, dans des conditions pédoclimatiques identiques coexistent bien souvent des individus au comportement post-traumatique radicalement différent. Un sapin bloqué en situation de déprésissement irréversible peut côtoyer un sapin identique par sa hauteur, son diamètre et son âge, mais exprimant un processus de résilience ! Une telle situation se rencontre aussi chez d'autres essences (DRÉNOU *et al.*, 2012). Il y a là un vaste sujet de travail pour les généticiens (étude des descendances, identification des gènes impliqués...) mais avant d'attendre les résultats, il y a surtout pour les forestiers l'opportunité de maintenir la diversité génétique locale pour renforcer l'adaptabilité des peuplements. Par exemple, contrairement à ce qui est habituellement préconisé, il n'est pas toujours nécessaire de couper en priorité les sujets dont le houppier est endommagé. Même si leur vitalité semble diminuée, ils peuvent être beaucoup moins vulnérables que leurs voisins et servir de semencier pour la régénération naturelle d'un peuplement. Utiliser la méthode ARCHI, c'est aussi disposer d'une description objective des déprésissements et de leurs tendances évolutives afin de juger de la pertinence des coupes sanitaires, qui, trop souvent, sont réalisées trop

Fig. 7 :
Clé ARCHI d'aide au diagnostic des déprésissements du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.).
Par convention le tronc est nommé A1.
Il se ramifie jusqu'en A4 (les A5 sont très peu nombreux).

précipitamment. Combien de sapins auraient pu exprimer une résilience s'ils n'avaient pas été coupés trop tôt ? Enfin, la désignation des arbres d'avenir lors des éclaircies peut très avantageusement s'appuyer sur la méthode ARCHI.

L'observation des arbres est un acte de gestion en soi. Le principal intérêt de la méthode ARCHI est d'intégrer en une seule analyse visuelle de nombreux aspects du fonctionnement de l'arbre et de permettre de prévoir le caractère réversible ou irréversible d'un dépérissement. On passe ainsi du diagnostic classique statique au pronostic dynamique.

Précisons cependant que la clef de détermination des types ARCHI n'identifie pas les causes d'un dépérissement, ni explique les différences de comportement (résilience ou mortalité) des arbres au sein d'un même peuplement. Sa prise en main sur le terrain nécessite une formation préalable. Comme pour tout diagnostic, les observations demandées sont d'autant plus difficiles à réaliser que les forêts sont denses et hautes. Pour le sapin vient s'ajouter une contrainte supplémentaire : la présence du gui est parfois si importante qu'elle peut masquer une grande partie de l'architecture des houppiers, ce qui, dans certains cas, peut rendre la méthode ARCHI inutilisable. Il est d'ailleurs conseillé de compléter le diagnostic ARCHI par une quantification de la présence du gui.

Le travail présenté ici est appliqué au sapin pectiné. Il mérite d'être étendu à d'autres essences, tant résineuses que feuillues, mais les critères architecturaux utilisables pour le sapin pectiné ne seront pas forcément pertinents pour d'autres espèces. L'étude préalable de l'ontogénèse de chaque espèce est nécessaire. Dans un deuxième temps, des regroupements par affinité architecturale pourront être envisagés et aboutir à un nombre limité de clefs ARCHI.

Mont Ventoux (Nicolas Mariotte – INRA Avignon) et des Vosges (Denis Girault, Max Gillette, Frédéric de Filippi, L.M. Nageleisen – DSF et Daniel Tourette, Jean-Michel Letz – ONF). Le résumé a été traduit en anglais et en espagnol par Charlotte Drénou. Merci à tous pour votre aide.

Cette étude a bénéficié des financements des projets OPCC (Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique) et RMT Aforce (Réseau Mixte Technologique – Adaptation des forêts au changement climatique).

Bibliographie

- Asse D., (2012) Dépérissements forestiers et changement climatique : que nous enseignent les observations récentes de la forêt françaises ? Mémoire Master 1, Université Paris Sud-AgroParisTech, 47 p.
- Aumonier T., Godard J.M., Mathieu P., Stavrakas G., (2006) Définir l'état sanitaire d'une parcelle d'épicéa commun. Protocole d'observation DSF.
- Aussenac G., (2002) Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. *Annals of Forest Science*, 59:823-832.
- Barthélémy D., Caraglio Y., & Sabatier S., (2009) Crown architecture of valuable broadleaved species. In Specker H., Hein S., Makkonen-Specker K., & Thies M. (Eds), Valuable broadleaved forests in Europe. Leiden: Brill (European Forest Institute Research Reports, vol. 22).
- Barthélémy D., Caraglio Y., (2007) Plant architecture : A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany*, 99, 375-407.
- Bastien Y., & Gauberville C. Coord., (2011) *Vocabulaire forestier*. Edition IDF - ONF - AgroParisTech, 554 p.
- Becker M., Levy G., (1983) Le dépérissement du chêne. Les causes écologiques. Exemple de la forêt de Tronçais en premières conclusions. *Revue Forestière Française*, 5 :341-356.
- Boutte B., & Girard P., (2008) Bilan de la santé des forêts en 2007, région méditerranéenne : le point sur quelques déperissements localisés en région méditerranéenne. Département de la santé des forêts, *Information technique* n°59, 2008, pp.10-11.
- Boutte B., (2011) Les réseaux d'observation du Département de la Santé des Forêts. *Forêt Méditerranéenne*, t. XXXII, n°2, 119-126.
- Cailleret M., (2011) Causes fonctionnelles du dépérissement et de la mortalité du sapin pectiné en Provence. Thèse de Doctorat, Université Paul-Cézanne, Aix-Marseille III, 160 p.
- Cailleret, M. & Davi, H. (2010) Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. *Trees*, 25, 265-276.
- Delatour, C. (1990) Déperissements de chênes et pathogènes. *Revue Forestière Française*, 42(2), 182-185.

Remerciements

La méthode ARCHI appliquée au sapin a été testée dans les sapinières des Pyrénées (Grégory Sajdak –IDF, Jonas Lambert – Ecole d'Ingénieurs de Purpan Toulouse et Laurent Burnel – INRA Dynafor), d'Auvergne (David Mourisset, Philippe Couvin – CRPF et Jean Lemaire – IDF), du

Christophe DRÉNOU
Flore GIRAUD
Institut pour
le développement
forestier (IDF)
Antenne de Toulouse
Maison de la Forêt
7, Chemin
de la Lacade
31320 Auzeville
Mél : christophe.
drenou@cnpf.fr

Herminie GRAVIER
Centre régional de la
propriété forestière
d'Auvergne (CRPF)
Maison de la Forêt
et du Bois
BP 104 Marmilhat
63370 Lempdes

Sylvie SABATIER
Yves CARAGLIO
Unité Mixte
de Recherche CIRAD-
CNRS-INRA-IRD
Université
Montpellier 2
"botAnique et
bioinformatique de
l'Architecture des
Plantes" (AMAP)
TA A51/PS2,
Boulevard
de la Lironde
34398 Montpellier
cedex 5

- Demers A., (1994) L'analyse architecturale du sapin baumier (*Abies balsamea* L. Mill.). Mémoire M. Sc., Faculté de foresterie, Université de Laval, Québec.
- Drénou C., (2009) *Face aux arbres, apprendre à les observer pour les comprendre*. Ulmer, Paris, 156 p.
- Drénou C., Bouvier M., Lemaire J., (2011) La méthode de diagnostic ARCHI. Application aux chênes pédonculés dépérissants. *Forêt entreprise*, 200, 4-15.
- Drénou C., Bouvier M., Lemaire J., (2012) Rôles des gourmands dans la résilience des chênes pédonculés dépérissants. *Forêt Wallonne*, 116, 42-55.
- Edelin C., (1977) Images de l'architecture des Conifères Thèse de Doctorat de 3^e Cycle, Université de Montpellier II, 255 p.
- Fady B., (2011) Les changements climatiques et leurs effets sur les forêts méditerranéennes : aspects génétiques. *Forêt Méditerranéenne*, t. XXXII, n° 2, 173-178.
- Giraud F., (2012) Suivi du dépérissement du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans les Pyrénées : croisement de deux méthodes, l'architecture et la télédétection, à deux échelles spatiales différentes. Mémoire de fin d'études, ENSSA, Université de Bordeaux 1, 34 p. + Annexes.
- Gravier H., (2012) Etude du dépérissement des sapinières du Livradois Forez. Mémoire de fin d'études, ENSSA de Bordeaux Aquitaine, 34 p. + Annexes.
- Grosfeld J. E., Barthélémy D., & Brion C., (1999) Architectural variations of *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch (Araucariaceae) in its natural habitat. In Hemsley, A. R., Kurmann, M. H. (Eds), The evolution of plant architecture (pp. 109-122). London : Royal Botanic gardens, Kew.
- Hallé F., Oldeman R.A.A, Tomlinson P.B, (1978) *Tropical trees and forest. An architectural analysis*. Berlin Heidelberg New York, Springer Verlag éd., 441 p.
- Hallé F., Oldeman R.A.A., (1970) *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Editions Masson et Cie. Paris.
- Heuret P., Nicolini E., Edelin C., Roggy J.-C., (2003) Approche architecturale pour l'étude des arbres de forêt tropicale humide guyanaise. *Revue Forestière Française*, numéro spécial, p. 158-178.
- Ishii H.-T., Ford E.-D., Kennedy M.-C., (2007) Physiological and ecological implications of adaptive reiteration as a mechanism for crown maintenance and longevity. *Tree Physiology*, 27, 455-462.
- Kennedy M.-C., Ford E.-D., Hinckley T.-M., (2009) Defining how aging *Pseudotsuga* and *Abies* compensate for multiple stresses through multi-criteria assessment of a functional-structural model. *Tree Physiology*, 30, 3-22.
- Millet J., (2012) *L'architecture des arbres des régions tempérées : son histoire, ses concepts, ses usages*. Éditions Multimondes, 397 p.
- Nageleisen L.M. (2012) Méthode d'évaluation de l'aspect des houppiers des arbres feuillus (protocole DEPEFEU). Département de la santé des forêts, document interne, 17 p
- Nageleisen L.M., Piou D., Saintonge F.X. & Riou-Nageleisen L.M., (2012) Méthode d'évaluation de l'aspect des houppiers des arbres feuillus (protocole DEPEFEU). Département de la santé des forêts, document interne, 17 p
- Nivert P. (2010) *La santé des forêts*. Edition IDF – DSF, 608 p.
- Nicolini E., & Caraglio Y., (1994) L'influence de divers critères architecturaux sur l'apparition de la fourche chez *Fagus sylvatica*, en fonction de l'absence ou de la présence d'un couvert. *Canadian Journal of Botany*, 72, 1723-1734.
- Nicolini E., Caraglio Y., Pélassier R., Leroy C., Roggy J.-C., (2003) Epicormic branches : a growth indicator for the tropical forest tree, *Dicorynia guianensis* Amshoff (Caesalpiniaceae). *Annals of Botany*, 92, 97-105.
- Nourtier M., (2011) La vulnérabilité du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) à la sécheresse en milieu méditerranéen selon les propriétés hydriques du sol. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, 244 p.
- Rameau J.C., Mansion D., Dumé G., (1989) *Flore forestière française*, Tome 1, Plaines et collines, IDF édit., Paris, 1785 p.
- Rutishauser E., Barthélémy D., Blanc L., Nicolini E.-A., (2011) Crown fragmentation assessment in tropical trees : Method, insights and perspectives. *Forest Ecology and Management*, 261, 400-407.
- Sabatier, S., Baradat Ph., & Barthélémy, D. (2003) Intra- and interspecific variations of polycyclism in young trees of *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex. Carrière and *Cedrus libani* A. Rich (Pinaceae). *Annals of Forest Science*, 60, 19-29.
- Sargent A.S., (2011) Diversité de la réponse au déficit hydrique et vulnérabilité au dépérissement du Douglas. Thèse, Université d'Orléans
- Taugourdeau O., (2011) Le sapin pectiné (*Abies alba* Mill., Pinaceae) en contexte méditerranéen : développement architectural et plasticité phénotypique. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 217 p.
- Taugourdeau, O., Dauzat, J., Griffon, S., Sabatier, S., Caraglio, Y. & Barthélémy, D. 2012. Retrospective analysis of tree architecture in silver fir (*Abies alba* Mill.): ontogenetic trends and responses to environmental variability. *Annals of Forest Science*, 69(6), 713-721.

Lexique

Acrotone : une ramification est acrotone si l'apparition des axes latéraux se fait au sommet des pousses.

Monopodial : dans le développement monopodial, la continuité d'un axe est assurée par le bourgeon terminal.

Orthotrope : se dit d'un axe à direction de croissance verticale et à symétrie radiale.

Phyllotaxie : disposition des feuilles autour d'un axe.

Plagiotope : se dit d'un axe à orientation horizontale sur toute sa longueur. Il présente le plus souvent une nette dorsiventralité.

Résumé

En région méditerranéenne, le sapin pectiné se trouve dans la limite sud de son aire de répartition et depuis 2003, des déprésissements sont observés dans le département de l'Aude et dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Ce constat préoccupe les forestiers et pose de façon cruciale la question du diagnostic de l'état de santé des arbres. Comment ne pas confondre vieillissement et déprésissement ? Quel est l'état normal, ou arbre de référence, d'un sapin ? Peut-on pronostiquer le caractère passager ou inéluctable d'un déprésissement ?

La méthode d'analyse architecturale des arbres (ou méthode ARCHI) appliquée au sapin répond à ces interrogations. En reconstituant la dynamique de développement depuis la plantule jusqu'à la sénescence, elle nous renseigne sur l'ontogénèse du sapin. C'est en se référant à cette séquence que la méthode ARCHI peut prendre en compte les deux composantes d'un déprésissement, à savoir : les symptômes de dégradation des houppiers, c'est-à-dire les écarts à la normale, et les processus de résilience, c'est-à-dire les retours à la normale (ou à un état proche de la normale). Cinq états sont ainsi définis : l'état normal (arbre sain), les écarts à la normale (arbres stressés), les retours à la normale (arbres résilients et descentes de cimes) et les points de non-retour à la normale (arbres en déprésissement irréversible).

Après simplification du protocole d'observation sur le terrain, une clef de détermination des types architecturaux est proposée aux gestionnaires forestiers. Les perspectives offertes par la méthode ARCHI sont passées en revue, de même que ses limites.

Summary

Diagnosis of stand architecture: a tool for assessing the decline in silver fir forests (*Abies alba* Mill., Pinaceae)

In the Mediterranean region, the silver fir is situated at the southern limit of its area of natural habitat and since 2003 forest decline has been observed in the department of the Aude and in the PACA region (Mediterranean France). This fact is of major concern to foresters and raises the crucial question of the diagnosis of the trees' health. How to avoid confusing ageing and forest decline? What is the normal state, or the benchmark tree, for a silver fir ? Can we predict the temporary or ineluctable character of forest decline?

The method of architectural analysis of trees (or ARCHI method) as applied to the silver fir answers such questions. Reconstituting the development dynamic from the seedling to decrepit old age provides information about the ontogeny of the silver fir. It is by reference to this sequence that the ARCHI method can highlight the two touchstone components of a decline: symptoms of crown deterioration, that is to say discrepancies from the normal; and the resilience that is the process of returning to normal (or close to the normal state). Within this framework, 5 states are defined: the normal (healthy tree), deviance from the normal (trees under stress), returns to the normal state (resilient trees and dieback of the upper crown) and the cases of non-return to a normal state (trees in irreversible decline). Following simplification of the guidelines for the observation protocol in the field, a key for determining architectural types is proposed to forest managers. The perspectives offered by the ARCHI method are analyzed along with its limits.

Resumen

Utilización del método de análisis arquitectural para diagnosticar la degradación forestal del abeto *Abies alba* Mill. (Pinaceae)

En la región mediterránea, el abeto (*Abies alba*) se encuentra en el límite sur de su área de distribución y desde 2003, se ha observado la degradación de las poblaciones de abetos en el departamento del Aude y en la región PACA. Esto preocupa a los agentes medioambientales y plantea de manera crucial la pregunta del diagnóstico del estado de salud de los árboles. ¿Cómo no confundir envejecimiento y degradación forestal? ¿Cuál es el estado normal, o árbol de referencia de un abeto? ¿Podemos pronosticar el carácter pasajero o ineluctable de una degradación forestal?

El método de análisis arquitectural de los árboles (método ARCHI) aplicado al abeto responde a estas preguntas. Reconstituyendo la dinámica de desarrollo desde la plántula hasta la senescencia, está nos informa sobre la ontogenia del abeto. Es refiriéndose a esta secuencia que el método ARCHI puede tomar en consideración los dos componentes de una degradación forestal que son: los síntomas de degradación de las copas, es decir las diferencias con lo normal, y los procesos de resiliencia, es decir la vuelta a lo normal (o a un estado cercano a lo normal). Así se definen cinco estados: el estado normal (árbol sano), las diferencias con lo normal (árboles estresados), la vuelta a lo normal (árboles resilientes y descenso de copa), y los casos de no-vuelta a lo normal (árboles en degradación irreversible).

Después de la simplificación del protocolo de observación en el terreno, se propone una clave de determinación de tipos arquitecturales a los gestores forestales. Las perspectivas ofertadas por el método ARCHI se han analizado, así como sus límites.