

**Outils produits dans le cadre du projet RMT-Aforce : Indicateurs architecturaux de la réponse des arbres aux modifications climatiques: pin d'Alep, pin sylvestre, cèdres, sapin, douglas, hêtre, chêne pédonculé, châtaignier.**

1. **Glossaire des termes morphologiques**
2. **Article pour Les RDV techniques de l'ONF**
3. **Fiches techniques par espèce : diagnostic ontogénique**
4. **Fiches techniques par espèce : marqueurs architecturaux Lexique des termes utilisés dans les clés ARCHI**
5. **Fiches pédagogiques de schématisation des chênes et du douglas**
6. **Document pédagogique pour la lecture architecturale des Chênes**
7. **Support pédagogique pour l'utilisation des clés ARCHI (document PDF)**



## 1. Glossaire des termes relatifs à la morphologie et à l'architecture des arbres

**Acrotonie.** L'acrotonie est définie par Troll (1937) comme le développement préférentiel des rameaux placés au sommet de la tige porteuse, celle-ci restant toutefois la plus développée. Selon que le système est monopodial ou sympodial, c'est-à-dire que l'axe porteur est à croissance indéfinie ou définie Rauh (1939) puis Champagnat (1947) distinguent respectivement une acrotonie primaire et une acrotonie secondaire. Bell (1991) envisage la ramification acrotone (« acrotonic branching ») comme étant le développement des rameaux les plus distaux d'une tige porteuse sans que celle-ci soit obligatoirement la plus développée.

**Allongement :** L'allongement d'une tige est la manifestation directement observable de la croissance primaire. Il est essentiellement le résultat d'un allongement cellulaire qui prend naissance un peu en arrière du dôme apical, d'où le qualificatif de « subapical growth » employé par Hackett (1985). D'anciens auteurs, faisant allusion à une croissance qui éloignait les différentes pièces élaborées par la croissance terminale, parlaient de croissance intercalaire (Sachs, 1874). Cette expression a été conservée par Rivals (1965, 1966) et Kozlowski (« intercalary growth », 1971). Ce phénomène, qui concerne essentiellement l'étirement des entre-noeuds, est encore appelé croissance internodale (Van Tieghem, 1884 ; Rivals, 1966).

**Architecture végétale :** cette expression désigne la série des caractères structuraux exprimée par une plante au cours de son développement (ontogénie) mais aussi la méthode d'étude de l'organisation spatio-temporelle de la structure végétale. A l'origine, cette notion et cette méthode ont été développées pour comprendre et caractériser l'élaboration de la forme des arbres tropicaux.

**Basitonie.** Le développement préférentiel de rameaux latéraux vigoureux à la base d'une tige est qualifiée de basitonie (Troll, 1937). Bell (1991) parle de " basitonic branching " quand les rameaux sont d'autant plus développés que l'on s'éloigne de l'apex de la tige.

**Bourgeon :** structure contenant un méristème apical entouré de jeunes feuilles en cours de formation puis des feuilles réduites et souvent coriaces (nommées écailles) formant protection.

**Cambium.** Le cambium ou assise cambiale est un méristème qualifié de secondaire car les cellules qui le constituent ne sont pas uniquement des cellules méristématiques primaires mais aussi des cellules qui ont retrouvé l'aptitude à se diviser (cellules à caractère embryonnaire ou totipotentes) par dédifférenciation de cellules parenchymateuses. Le cambium produit des tissus (fonction histogène) dédiés à la vascularisation (bois et liber), à la mise en réserve (rayons) et au soutien (fibre). L'activité de division cellulaire et les tissus qui en résultent par différenciation permettent l'accroissement en diamètre des axes (racinaires et caulinaires) d'une plante.

**Coiffe.** La coiffe est un tissu situé à l'extrémité des axes racinaires. Elle protège le méristème racinaire qui de fait se retrouve en position sub-apicale. La coiffe est constituée de cellules, générées par une zone méristématique (le méristème de la coiffe), qui desquament lors de la progression de la racine dans le sol.

**Croissance.** Lorsque le méristème terminal d'un axe feuillé se transforme à un moment de sa vie en une structure incapable de poursuivre un fonctionnement végétatif ultérieur (fleur, inflorescence,

épine, vrille, tissu parenchymateux,...) ou lorsqu'il meurt (seul, avec l'ensemble des pièces du bourgeon ou avec la portion distale de l'axe qui le porte), on parle de croissance définie (« definite extension » Bell, 1991).

Si le méristème terminal garde la potentialité de fonctionner indéfiniment, on parle de croissance indéfinie (« indefinite extension » Bell, 1991). Impliquant une idée de durée potentielle du fonctionnement d'un méristème, ce qualificatif d'indéfinie est un abus de langage justifié par la nécessité d'opposer ce cas à la croissance définie (Guinochet, 1965). Dans la pratique, il n'est pas toujours facile de trancher entre ces deux expressions dont la qualification, se référant à une durée relative, est soumise dans une large mesure à la subjectivité de l'observateur.

Hallé et al. (1978) distinguent :

- des axes qui ne présentent pas de périodicité d'allongement endogène marquée et qui sont dits à croissance continue (" continuous growth "),

- des axes qui montrent une périodicité d'allongement endogène marquée et qui sont dits à croissance rythmique (" rhythmic growth ").

**Liber.** Le liber ou phloème secondaire est un tissu conducteur produit par le cambium et permettant le transport des assimilats issus de la photosynthèse. Il est constitué de cellules conductrices (tubes criblés et cellules compagnes), de cellules de soutien (fibres libériennes), et de cellules de rayons (voir cambium).

**Méristème.** Le mot méristème provient du grec meristos=division. Dans les années 1750 où se situe un renouveau pour la connaissance du végétal et la formation de la botanique, les naturalistes s'intéressent à l'extrémité de la tige, partie où s'effectue le développement. C'est en effet une caractéristique du végétal que de croître par ses extrémités. Cette partie où se produit la croissance caulinaire a été appelée « punctum vegetationis » par De Wolf en 1759. Avec le développement des moyens optiques, les tissus puis les cellules ont été délimités puis caractérisés, on parle alors de point végétatif ou zone apicale actuellement. Au sommet de cette zone apicale se situe le méristème.

Le méristème est l'ensemble des cellules situées à l'extrémité d'un axe qui par leur aptitude à se diviser génère les différentes parties du végétal (feuille, tige, racine, organe de reproduction).

Chez l'embryon, des cellules perdent leur aptitude à se diviser pour se spécialiser dans certaines fonctions, c'est le phénomène de différenciation tandis que d'autres conservent cette faculté de division, elles restent totipotentes et forment les tissus méristématiques caulinaires et racinaires.

**Mésotonie.** La mésotonie, enfin, est caractérisée par le développement préférentiel des rameaux latéraux dans la partie médiane d'une tige (Troll, 1937).

**Métamorphose architecturale.** processus par lequel certaines branches modifie progressivement en des structures exprimant la complexité et le comportement du tronc et participant à la construction de la cime de l'arbre.

**Monopode.** Dans la ramification monopodiale (Emberger, 1960) ou monopodique (Sachs, 1874), les rameaux latéraux se développent sans qu'il y ait arrêt définitif du fonctionnement du méristème de la tige principale : l'ensemble ramifié qui en découle est qualifié de monopode.

**Multiplication végétative.** La multiplication est un procédé très fréquent chez les végétaux permettant de dupliquer l'organisme puis de le rendre autonome et indépendant de l'organisme géniteur en évitant la phase reproductrice, c'est-à-dire en évitant des recombinaisons génétiques, autrement dit aboutissant au clonage de l'individu.

**Néoformation** (voir Préformation)

**Organogénèse.** L'organogénèse se déroule au niveau de l'apex d'une tige. C'est dans sa partie la plus distale ou méristème terminal (Nougarède et Rembur, 1985) que se produisent des phases d'intense activité mitotique au cours desquelles sont initiés de nouveaux éléments de la tige ou métamères. Ce phénomène, trouvant son origine au sommet de l'axe feuillé, a été qualifié de croissance terminale par Van Tieghem (1898) ou encore de croissance apicale par Rivals (1966).

**Polycyclisme.** Au cours d'une même année de végétation, une tige peut résulter d'une ou plusieurs unités de croissance ou être constituée d'un ou de plusieurs cycles morphogénétiques. La pousse sera alors respectivement qualifiée de monocyclique ou polycyclique. Cette notion de cycle morphogénétique (C.M.), défini à partir des Pins (Prat, 1936), peu usitée, peut toutefois s'employer pour désigner une périodicité spatiale chez tout type de plantes quand on ignore tout de ses liens avec la cinétique d'allongement.

Pour des plantes dont les unités de croissance successives sont toutes identiques, la notion de polycyclisme n'a aucun intérêt. Par contre, chez les espèces originaires de la zone tempérée de l'hémisphère nord, le niveau d'organisation plus complexe qui peut en résulter correspond à la notion de pousse annuelle. Cette notion assez bien connue recouvre différents types de structures qui sont caractérisables par de nombreux paramètres et notamment par leur mode de croissance ou de ramification.

**Préformation.** Une tige ou une portion de tige peut être entièrement préformée (croissance prédéterminée, au sens de Hallé et al., 1978) ou entièrement néoformée (croissance indéterminée, au sens de Hallé et al., 1978), elle peut aussi comporter une partie préformée suivie d'une partie néoformée. Dans ce dernier cas, des marqueurs morphologiques permettent, le plus souvent, de distinguer, a posteriori, les deux parties de l'unité de croissance ou le passage entre les deux. Les notions de préformation et de néoformation peuvent s'appliquer à plusieurs niveaux d'organisation de la plante, qu'il convient alors de préciser.

**Rameau épicornique.** Rameau issu d'un méristème latéral ayant présenté une phase de repos de plusieurs années (on parle de méristème latent) et en conséquence son expression s'observe sur des axes présentant une production de bois et une écorce développée.

**Ramification.** Pour Bugnon (1980) la ramification est « ...le fait qu'une unité morphologique du corps [du végétal] donne naissance à une ou plusieurs unités nouvelles de même nature fondamentale qu'elle-même. En principe, l'unité génératrice et les unités apparues restent associées en un ensemble dit système ramifié. » Si cette définition a le mérite d'éviter toute confusion entre la ramification (le processus) et le résultat de ce processus (le rameau ou le système ramifié), elle présente, en outre, l'avantage d'attirer notre attention sur la nécessité, pour décrire un système ramifié, de distinguer l'« unité génératrice » des « unités apparues ». La nécessité pour ces deux types d'entités d'être de même nature permet de faire une distinction nette entre la croissance d'un

axe feuillé (ou élaboration de nouveaux métamères par un méristème apical) et la ramification caulinaire qui correspond à la production d'un axe feuillé à partir d'un autre. Cette définition écarte également, de fait, les tiges qui naissent sur des organes de nature non caulinaire à partir du développement de méristèmes néoformés (drageons, bulbilles développées sur des feuilles,...) (voir multiplication végétative).

**Ramification latérale.** La ramification latérale résulte de la différenciation, sur les flancs de l'apex d'une tige, d'un territoire de cellules à caractères embryonnaires. Ce territoire se développe à l'aisselle d'une ébauche foliaire et forme un méristème latéral. Par son fonctionnement, ce méristème latéral pourra alors édifier à son tour un nouvel axe feuillé, dont il deviendra le méristème terminal et qui sera qualifié d'axe latéral ou rameau. La ramification latérale correspond au mode de ramification le plus répandu chez les végétaux vasculaires. Chez les Angiospermes, ce processus aboutit à la formation de rameaux, généralement axillaires et qu'il est possible d'identifier, la plupart du temps, par la présence du (ou des deux) premier(s) organe(s) foliaire(s) qui occupe(nt) une position précise : les préfeuilles.

**Ramification terminale.** Chez les végétaux dont l'apex présente un méristème apical (Buvat, 1989 ; Sinnott, 1960), la ramification terminale (Gatin, 1924) correspond à une division de ce dernier directement au niveau du dôme méristématique. Selon que cette division entraîne la formation de deux rameaux ou plus, on parlera respectivement de dichotomie ou de polytomie (Gatin, 1924). Ce mode de division peut aboutir à la formation de deux (ou plusieurs) parties égales ou inégales, et on parlera alors respectivement de dichotomie (polytomie) isotone ou anisotone.

Ce mode de division se rencontre chez les Ptéridophytes, les Bryophytes et les Thallophytes mais il intéresse alors seulement une ou un faible nombre de cellules apicales (Emberger, 1960). Chez les Angiospermes, la ramification terminale est rare. Elle a été décrite chez quelques Monocotylédones appartenant à des familles comme les Arecaceae (*Hyphaene thebaica* (L.) C. Martius, Schoute, 1909 ; *Nypa fruticans* Wurmb, Tomlinson, 1971 ; *Chamaedorea cataractarum* Martius, Fisher, 1974), les Flagellariaceae (*Flagellaria indica* L., Tomlinson et Posluszny, 1977) ou les Musaceae (*Strelitzia reginae* Banks ex Dryander, Fisher, 1976), et de manière plus occasionnelle chez les Dicotylédones, dans la famille des Cactaceae (*Mammillaria* spp., Boke, 1976) et des Asclepiadaceae (*Asclepias syriaca* L., Nolan, 1969).

**Ramification immédiate.** Processus au cours duquel un méristème latéral, immédiatement après sa mise en place, sans subir de phase de repos (sans phase bourgeon), donne naissance à un rameau qualifié de rameau à développement immédiat.

**Ramification différée.** Processus au cours duquel un méristème latéral, après sa mise en place, présente une phase de repos (phase bourgeon) avant de donner naissance à un rameau qualifié de rameau à développement différé.

**Réitération.** Même si quelques arbres restent conformes à leur unité architecturale tout au long de leur vie, il est facile de constater dans la nature que, chez la plupart des espèces, l'arbre jeune, pyramidal, entièrement hiérarchisé autour d'un tronc unique, cède la place, à des âges plus avancés, à un arbre plus complexe dont la cime s'arrondit et dont le houppier se structure autour de nombreuses et puissantes branches maîtresses. Cette transformation résulte, le plus souvent, d'une duplication de l'unité architecturale au cours de l'ontogénèse. Définie pour la première fois par

Oldeman (1974) sous le terme de répétition, ce mode particulier de duplication peut être de natures diverses et revêtir bien des aspects chez les végétaux (Hallé et al., 1978). Il n'en reste pas moins le processus essentiel par lequel s'édifie la cime de la plupart des arbres (Edelin, 1977, 1984, 1986; Barthélémy et al., 1989, 1991; Sanoja, 1992) au cours d'une métamorphose architecturale (Hallé et Ng, 1981; Edelin, 1984).

**Répétition partielle.** Lorsque la duplication ne reprend qu'une partie de l'unité architecturale (une branche qui porte une branche), la structure dupliquée résulte de la répétition partielle de l'unité architecturale.

**Sympode.** Dans la ramification sympodiale (Emberger, 1960) ou sympodique (Sachs, 1874), le méristème terminal de l'axe porteur meurt ou se transforme en une structure qui perd sa faculté de croître végétativement. La poursuite de la croissance est alors assurée par le fonctionnement d'un ou de plusieurs méristèmes latéraux qui édifieront autant d'axes latéraux ou axes relais, et l'ensemble ramifié sera qualifié de sympode. Selon que cette ramification aboutit à la formation de un, deux ou plus de deux relais, on parlera respectivement de sympode monochasial, dichasial, ou polychasial.

Dans la ramification sympodiale, la mort du méristème terminal et le développement des relais peuvent être très précoces et s'effectuer à l'intérieur même du bourgeon. Dans ce cas, le sympode qui en résulte peut présenter une physionomie rappelant une dichotomie et on parle alors de fausse dichotomie ou pseudo-dichotomie (Tomlinson, 1970). Lors de la ramification sympodiale d'un axe, un relais peut se placer exactement dans le prolongement de la tige porteuse donnant alors au système ramifié sympodial une physionomie monopodiale. Troll (1937) puis Rauh (1939) parlent, pour désigner ce type de structure, de " pseudomonopodium ".

**Unité architecturale.** La formation, par le méristème apical du tronc et des branches, de pousses annuelles de plus en plus vigoureuses au cours des premières étapes de l'ontogénie, conduit les structures les plus "différenciées" à être "repoussées" à la périphérie de l'arbre. Quel que soit le mode de croissance spécifique, ce phénomène aboutit à un stade architectural relativement stable et fortement hiérarchisé au niveau duquel il est possible de distinguer un nombre fini de catégories d'axes différenciables entre elles par des caractéristiques morphologiques et fonctionnelles. Le nombre de ces catégories d'axes, leur nature et la manière dont elles s'agencent entre elles définissent alors le «diagramme architectural» (Edelin, 1977) ou encore « l'unité architecturale » (Barthélémy et al., 1989, 1991) d'une espèce donnée.

**Unité de croissance.** L'unité de croissance (U.C. ; unit of extension) correspond à la structure mise en place par la tige au cours d'une phase d'allongement ininterrompue (Hallé et Martin, 1968). Sa détermination requiert la connaissance de l'aspect temporel de l'allongement, c'est-à-dire la cinétique de mise en place des éléments de la tige, elle est matérialisée ou non par des marqueurs morphologiques (écailles foliaires, entre-noeuds courts...).

**Unité de morphogénèse.** L'unité de morphogénèse (U.M. ; unit of morphogenesis) correspond à l'ensemble des organes initiés par le méristème apical durant une phase d'organogénèse ininterrompue (Hallé et Martin, 1968). Elle est unique dans le cas de plantes à croissance continue (Palmier) ou chez certaines plantes à croissance rythmique (Thé), tandis que chez les plantes qui montrent une alternance de phases d'activité et d'inactivité mitotique, les tiges résultent de

plusieurs U.M. successives. Notons que les études cytologiques nécessaires pour déterminer cette U.M. n'ont été entreprises que pour de trop rares cas et que son existence et sa structure restent à identifier chez la plupart des espèces.

### Références bibliographiques

BARTHELEMY D., 1991. Levels of organization and repetition phenomena in seed plants. *Acta Biotheoretica*, 39, 309-323.

Barthélémy D., Edelin C., Hallé F. 1989. Architectural concepts for tropical trees. In: *Tropical forests: Botanical dynamics, speciation and diversity*, L.B. Holm-Nielsen and H. Balslev (Eds.), 89-100, Academic Press, London.

BARTHELEMY D., EDELIN C., HALLE F., 1991. Canopy architecture. In : *Physiology of trees*, A.S. Raghavendra (Ed.), John Wiley and Sons Inc., 1-20.

BELL A., 1991. *Plant form. An illustrated guide to flowering plant morphology*. Oxford University Press. Oxford, New York, Tokyo; 341 p.

BOKE N., 1976. Dichotomous branching in *Mammillaria* (Cactaceae). *American Journal of Botany*, 63, 1380-1384.

BUGNON F., 1980. Bases fondamentales pour l'étude de la ramification chez les végétaux. Principales modalités de ce phénomène. *Bull. Soc. bot. Fr., Actualités bot.*, 127, 2, 5-14.

BUVAT R., 1989. *Ontogeny, Cell Differentiation, and structure of Vascular Plants*. Springer-Verlag, Berlin; 581 p.

CHAMPAGNAT P., 1947. Les principes généraux de la ramification des végétaux ligneux. *Revue horticole*, 2143, 335-341.

EDELIN C., 1977. Images de l'architecture des Conifères. Th. Doct. 3 Cycle, Biol. vég. Université Montpellier II; 255 p.

EDELIN C., 1984. L'architecture monopodiale: l'exemple de quelques arbres d'Asie tropicale. Th. Doct. Etat, Univ. Montpellier II; 258 p.

EMBERGER L., 1960. Les végétaux vasculaires. Tome II du *Traité de Botanique Systématique*, Chadeaud M. et Emberger L., Masson, Paris ; 1540 p.

FISHER J.B., 1974. Axillary and dichotomous branching in the palm *Chamaedorea*. *American Journal of Botany*, 61, 1046-1056.

FISHER J.B., 1976. Development of dichotomous branching and axillary buds in *Strelitzia* (Monocotyledonae). *Canadian Journal of Botany*, 54, 578-592.

GATIN C.-L., 1924. *Dictionnaire de Botanique*. Lechevalier, Paris ; 847 p.

GUINOCHET M., 1965. *Notions fondamentales de botanique générale*. Masson, Paris ; 446 p.

- HACKETT W.P., 1985. Juvenility, Maturation, and Rejuvenation in Woody Plants. *Horticultural Reviews*, Vol.7, 109-155.
- HALLE F., MARTIN R., 1968. Etude de la croissance rythmique chez *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. (Euphorbiaceae - Crotonoïdées). *Adansonia*, série 2, 8, 4, 475-503.
- HALLE F., NG F. 1981. Crown construction in mature dipterocarp trees. *The Malaysian Forester*, vol 44, n°2 et 3, 222-233.
- HALLE F., OLDEMAN R.A.A., 1970. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson, Paris; 178 p.
- HALLE F., OLDEMAN R.A.A., TOMLINSON P.B., 1978. *Tropical trees and forests*. Springer Verlag, Berlin; 441 p.
- KOZLOWSKI T.T., 1971. *Growth and Development in Trees*. Vol. 1: Seed Germination, Ontogeny, and Shoot growth; 443 p. - Vol. 2: Cambial growth, Root Growth, and Reproductive Growth; 514 p. Academic press, Inc., New York et London.
- NOUGAREDE A., REMBUR J., 1985. Le point végétatif en tant que modèle pour l'étude du cycle cellulaire et de ses points de contrôle. *Bull. Soc. bot. Fr.*, 132, 9-34.
- OLDEMAN R.A.A., 1974. L'architecture de la forêt guyanaise. Mémoire n° 73, O.R.S.T.O.M., Paris ; 204 p.
- RAUH W., 1939. Über Gesetzmässigkeit der Verzweigung und deren Bedeutung für die Wuchsformen der Pflanzen. *Mitt. Deut. Dendr. Ges.*, 52, 86-111. REES A.R., 1964. The apical organization and phyllotaxis of the Oil Palm. *Ann. Botany (N.S.)*, 28, 209, 69.
- RIVALS P., 1965. Essai sur la croissance des arbres et sur leurs systèmes de floraison (Application aux espèces fruitières). *J. Agr. Trop. Botan. Appl.*, 12, 655-686.
- RIVALS P., 1966. Essai sur la croissance des arbres et sur leurs systèmes de floraison (Application aux espèces fruitières). *J. Agr. Trop. Botan. Appl.*, 13, 91-122.
- SANOJA E., 1992. Essai d'application de l'architecture végétale à la systématique. L'exemple de la famille des Vochysiaceae. Thèse Doct., *Physiol. et Biol. des Organismes et des populations*, U.S.T.L. Montpellier II; 404 p.
- SCHOUTE J.C., 1909. Über die Verästelung bei monokotylen Bäumen. II. Die Verästelung von *Hyphaene*. *Rec. Trav. Botan. Néerl.*, 15, 211-232. SHAW G.R., 1907. Characters of *Pinus*: the lateral cone. *Botanical Gazette*, 43, 205-209.
- SINNOTT E.W., 1960. *Plant morphogenesis*. Mac Graw-Hill Book Company, New-York; 550 p. SPATH H.L., 1912. *Der Johannistrieb*. Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde, Friedrich-Wilhelms-Universität, Berlin; 91p.
- TOMLINSON P.B., 1970. Dichotomous branching in *Flagellaria indica* (Monocotyledones). *J. Linnean Soc. Botan. Suppl.* 1, 63, 1-14.

TOMLINSON P.B., 1971. The shoot apex and its dichotomous branching in the *Nypa* palm. *Ann. Botany*, 35, 865-879.

TOMLINSON P.B., POSLUSZNY U., 1977. Features of dichotomizing apices in *Flagellaria*. *American Journal of Botany*, 64, 9, 1057-1065. TRECUL A., 1847. Recherches sur l'origine des bourgeons adventifs. *Extr. Res. Ann. Sc. Nat.*, 8, 268-295. TROLL W., 1937. *Vergleichende Morphologie der höheren Pflanzen*. Berlin, Borntraeger; 2736 p.

TROLL W. 1937. *Vergleichende Morphologie des höheren Pflanzen*. Berlin, Borntraeger, Band 1, teil1.

VAN TIEGHEM Ph., 1884. *Traité de Botanique*. Masson et compagnie, Paris; 1000 p.

VAN TIEGHEM Ph., 1898. *Éléments de Botanique*. Volume 1 : Botanique générale ; 559 p.- Volume 2 : Botanique spéciale; 612 p. Masson et compagnie, Paris.

2. **Article pour Les RDV techniques de l'ONF**
  
3. **Fiches techniques par espèces: le diagnostic ontogénique**
  
4. **Fiches techniques par espèce : marqueurs architecturaux**

# L'architecture des arbres au service des forestiers

Sylvie Sabatier\*, Yves Caraglio\* et Christophe Drénou\*\*

\*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

\*\* Centre National de la Propriété Forestière, Institut pour le Développement Forestier (IDF) - Antenne de Toulouse - Maison de la Forêt - 7, chemin de la Lacade - 31320 Auzeville Tolosane

Résumé : Basés sur le diagnostic architectural, nous proposons quatre outils pour diagnostiquer les arbres et évaluer leur réactivité face aux perturbations environnementales. Le diagnostic ontogénique, outil déjà utilisé, permet d'identifier le stade de développement de l'arbre. Des checklists de marqueurs architecturaux listent les critères pour décrire un arbre. Les clés de détermination ARCHI, outils aboutis, sont utilisées pour pronostiquer l'avenir à court terme des arbres présentant des symptômes de dépérissement. L'application DIAGARCHI, en cours de réalisation, sera un support pédagogique, afin de familiariser l'utilisateur aux connaissances morphologiques pré-requises, et technologique afin d'obtenir automatiquement les résultats aux diagnostics. Ces outils pourraient contribuer aux prises de décision d'intervention lors de dépérissement des arbres.

Mots clés : architecture des arbres, analyse rétrospective, diagnostic de l'arbre, dépérissement, cèdre de l'atlas, chataignier, chêne, douglas, hêtre, pins, sapin pectiné

Née dans les années 1970 pour caractériser la forêt tropicale humide, l'architecture végétale a rapidement été transférée aux problématiques des régions tempérées, en particulier celles de la production fruitière ainsi que celles des soins à apporter aux arbres d'ornement. Les forestiers se tournent eux-aussi vers cette discipline botanique car les incertitudes sur le comportement des arbres face au changement climatique sont nombreuses. Comment décrire précisément les arbres (diagnostic), traduire les informations visuelles en termes de fonctionnement (physiologie) et anticiper l'avenir (pronostic) ? Pour y parvenir, les auteurs de cet article proposent une série de marqueurs architecturaux, des plus simples destinés aux propriétaires forestiers aux plus complexes pour les chercheurs et experts.

## Introduction

L'intérêt pour la compréhension de la croissance des arbres est apparu très tôt et a commencé par l'identification et la caractérisation des parties constitutives du végétal. Cet aspect descriptif est basé sur la morphologie qui découpe très classiquement l'organisme en feuille, tige et racine. La démarche permet de caractériser localement les parties de la plante mais ne renseigne en rien sur les modalités de construction de la structure végétale. L'organisme végétal est avant tout une structure qui se complique au cours du temps depuis la germination jusqu'à sa mort en occupant l'espace à partir de son point d'ancrage au niveau du sol. De fait, l'*architecture végétale* (les termes en italique sont définis dans le lexique) vise à comprendre la dynamique d'édification de la structure végétale dans l'espace et au cours du temps. Ainsi, bien que reposant sur la morphologie, l'architecture végétale s'en distingue fondamentalement par une prise en compte de la globalité de la plante et par une vision dynamique de son édification (Barthélémy et Caraglio, 2007).

Cette discipline botanique est née sous les tropiques et dans le but de caractériser la forêt tropicale humide au travers de l'état de structuration des arbres. C'est Francis Hallé qui a mis en place la méthode et les premiers concepts (modèle architectural, Hallé et Oldeman, 1970). Oldeman a

développé à cette époque (1974) la notion de *réitération* (duplication d'une architecture). L'introduction de concepts plus proches de l'espèce (*unité architecturale*, Edelin 1977, Barthélémy et al, 89) a permis d'aborder par la suite la modélisation de l'architecture (de Reffye et al., 19991 ; de Reffye et Blaise, 1993) pour aborder des questions de production en arboriculture fruitière puis de production forestière qui ont donné un grand nombre de résultats dans le cadre d'un rapprochement avec l'INRA et d'une forte collaboration avec l'IDF dans les années 90-97. La question de construction et de vieillissement des grands arbres tropicaux et tempérés s'est traduite par un certain nombre de concepts utilisables pour effectuer des diagnostics de l'état de développement des arbres (diagnostic architectural) et à donner lieu à un certain nombre de transferts de connaissances depuis les années 2000 (formations, littérature de vulgarisation). Actuellement, la demande des gestionnaires et des professionnels de l'arbre se traduit par la mise en place de divers programme de recherche locaux, nationaux et européens.

Nous proposons quatre outils pour diagnostiquer les arbres et évaluer leur réactivité face aux perturbations environnementales.

### **Outil n°1 : le diagnostic ontogénique**

Le diagnostic ontogénétique sert à identifier le stade de développement d'un arbre. C'est un préalable indispensable à tout autre diagnostic Cet outil est utilisé depuis longtemps par les gestionnaires des arbres d'ornement en France comme à l'étranger (Canada, Espagne, Belgique, Allemagne...).

Le développement d'un végétal est caractérisé par un changement continu du fonctionnement des *méristèmes* induisant une modification progressive de l'architecture. L'analyse architecturale permet de découper en étapes ce développement et d'établir ainsi une séquence précise et ordonnée d'événements morphologiques jalonnant la vie de l'arbre. A ce sujet, il ne faut pas confondre la croissance très connue des forestiers, laquelle traduit l'augmentation d'un caractère (hauteur, circonférence...), et le développement qui correspond à l'apparition ou la disparition de caractères (réitération, floraison...). Le développement prend donc en compte les changements morphologiques endogènes au cours du temps. Chaque essence possède sa propre séquence ontogénétique et cette dernière est considérée en architecture comme la référence d'un développement optimal. Une telle approche se distingue de la notion « d'arbre de référence » que les forestiers définissent comme « arbre normal » pour les conditions pédologiques, climatiques et sylvicoles d'une localité donnée. Avec une telle définition, le risque est d'avoir autant d'arbres de références que de peuplements, de stations et de stades de développement, ce qui peut considérablement biaiser les diagnostics de l'état des forêts. Avec le concept de « séquence de développement » au contraire, il y a une prise en compte de la part endogène du développement indépendante de l'environnement local.

Comment identifier chaque stade de développement ?

- Le stade « jeune » est conforme à l'*unité architecturale*. Les branches portent des rameaux et ramilles (sapin, douglas, chêne et châtaignier) ou des rameaux, ramilles et rameaux courts (cèdre, pin et hêtre). L'arbre présente une structure fortement hiérarchisée autour du tronc unique. Le contour du houppier est pyramidal. *La pousse annuelle* du tronc est longue. Les essences *polycycliques* produisent jusqu'à 4 *unités de croissance* par an.
- Le stade « adulte » correspond à un enrichissement de la ramification par la *réitération immédiate* des branches, à l'expression de la sexualité et au début de formation de la couronne. Ce stade est identifiable par la structure des branches montrant des réitérations immédiates (fourches) successives latérales. Les rameaux vigoureux sont *hypotones* ou *amphitones*. Chez les feuillus, ce stade est identifiable par la présence

d'une fourche à l'extrémité du tronc. Le contour du houppier est régulier et compact. Il s'arrondit en *cime*. La pousse annuelle est longue.

- Le stade « mature » correspond à une diminution des capacités de ramification et une forte expression de la sexualité. La cime est constituée d'une succession de fourches de plus en plus rapprochées les unes des autres au cours du temps. Les rameaux vigoureux sont *épitones* et la périphérie du houppier est constituée de pousses très courtes, peu ramifiées. La réduction de la taille des pousses annuelles et de la ramification entraîne une homogénéisation des structures mises en place. Les conifères montrent une forme tabulaire au sommet du tronc. Les axes tendent vers une direction de croissance horizontale. Les feuillus ont un contour du houppier irrégulier et éclaté en une multitude de petites cimes. Les pousses annuelles sont plus courtes avec moins de feuilles. L'arbre a atteint sa hauteur maximale.
- Le stade « sénescence » est caractérisé par la mise en place d'*unités minimales*, par une mortalité des axes qui progresse de la périphérie vers la base de l'arbre, par une diminution de la capacité à produire des rameaux épécormiques vigoureux et par une lente dislocation du houppier. Chez les conifères et espèces monoïques, la sexualité mâle tend à devenir prépondérante.

L'outil se présente sous forme de fiches pédagogiques, une par essence, avec des schémas légendés des quatre stades décrits précédemment. Le diagnostic ontogénique d'un arbre donné se fait par comparaison avec les étapes de la séquence de développement de l'espèce.

### **Outil n°2 : les checklists de marqueurs architecturaux**

Cet outil a pour but de lister l'ensemble des marqueurs architecturaux utilisables pour décrire un arbre. Il est utilisable dans de nombreuses situations forestières : notation d'arbres jeunes dans des essais expérimentaux, comparaison de provenances géographiques, choix des arbres d'avenir, sélection génétique, suivi de peuplements dans le cadre d'observatoires du changement climatique...

Un arbre est composé de plusieurs niveaux d'organisation : *unité de croissance*, axe ramifié, *unité architecturale*, arbre entier. 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 d'ailleurs 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 les résineux. Nous avons donc retenus des critères architecturaux simples adaptés à chaque échelle d'observation (arbre entier, système ramifié et pousse annuelle) et à chaque stade de développement. Une combinaison de critères permet d'estimer le degré de réactivité d'un arbre aux perturbations de l'environnement. Ces checklists prennent en compte la diversité architecturale des espèces forestières. Ainsi, le développement des cèdres, du douglas, des pins et des sapins est *monopodial* alors que celui du châtaignier et des chênes est *sympodial*. La croissance du pin d'Alep et celle des chênes montrent systématiquement du *polycyclisme*. Les pins d'Alep et sylvestre, le hêtre, le châtaignier et les chênes subissent une *métamorphose architecturale*. Le cèdre et les pins ne produisent pas de *rameaux épécormiques*, mais ils possèdent des rameaux courts capables de devenir longs en cas de stress et de jouer ainsi un rôle dans la restauration des axes dépérissants. Le cèdre possède une forte capacité à mettre en place des *rameaux à développement immédiats* tandis que chez beaucoup d'autres espèces, cette capacité est faible ou inexistante. Le pin sylvestre présente

une grande variabilité de formes s'expliquant par une forte capacité à dupliquer le tronc à partir d'une branche et à remplacer ainsi le tronc initial.

Pour chaque critère, des schémas simplifiés accompagnés de photographies présentent une gamme d'expressions. Il suffit de cocher celles correspondant à la structure observée. L'exemple d'une checklist est donné ci-dessous.

<b>Checklist des marqueurs architecturaux pour <i>Abies alba</i> adulte au niveau du houppier hors concurrence</b>
Contour de la cime : pyramidal, arrondi ou tabulaire
Rameaux inter-verticillaires sur le tronc : oui/non
Tassement brutal des branches le long du tronc : oui/non
Fourches réitératives sur les branches : oui/non
Zone végétative entre la cime portant les cônes femelles et la zone mâle : oui/non
Rameaux épicorniques sur les branches : oui/non
Rameaux épicorniques sur le tronc : oui/non
Redressement de branches : oui/non
Arrêt temporaire du fonctionnement du bourgeon apical édificateur : oui/non
Durée de vie des feuilles sur le tronc, les branches et les rameaux
Mortalité sur le tronc, les branches et/ou les rameaux : oui/non

### **Outil n°3 : les clés de détermination ARCHI**

Cet outil sert à pronostiquer l'avenir à court terme des arbres présentant des symptômes de dépérissement. S'appuyant sur une simplification des critères décrits dans le chapitre précédent, il propose des clés de détermination architecturale spécifiques à chaque essence ou groupe d'essences (une seule clé pour les chênes sessile, pédonculé et pubescent). Chacune guide l'observateur en lui posant des questions à réponse binaire oui/non et en le conduisant vers six sorties possibles :

- arbre sain : arbre dont l'architecture est conforme à son stade de développement,
- arbre stressé : arbre dont l'architecture s'écarte de la norme et dont l'avenir est incertain,
- arbre résilient : arbre présentant une dynamique de retour à la normale,
- arbre en descente de cime : arbre présentant une dynamique de construction d'un nouvel houppier sous la cime,
- arbre en situation de dépérissement irréversible : arbre bloqué dans une situation de non-retour à la normale
- arbre mort.

Les clefs intègrent trois séries d'observation : la structure séquentielle mise en place au cours du développement qui renseigne sur le stade de développement de l'arbre; les symptômes de dégradation du houppier (mortalité, appauvrissement de la ramification) et enfin les processus de restauration du houppier résultant essentiellement du développement de rameaux épicorniques. L'étude du rapport de force entre ces processus antagonistes –dégradation et restauration- permet de porter un diagnostic sur l'arbre. Ainsi, deux chênes ayant le même taux de mortalité, ou présentant un déficit foliaire identique, n'auront pas du tout le même devenir selon la nature des rameaux épicorniques qu'ils portent. Si ceux-ci, même nombreux, sont très peu vigoureux, ils parviendront à synthétiser la quantité de sucres nécessaire à leur pérennité, à la formation éventuelle de nouveaux petits rameaux épicorniques et au renouvellement des racines fines, mais seront dans l'incapacité de restaurer une architecture normale. Si au contraire des rameaux épicorniques vigoureux sont présents, même en petite quantité, une dynamique de résilience du houppier est possible. Les analyses de la largeur des cernes ont clairement montré ces différences de comportement chez le chêne pédonculé (Drénou et al., 2012). Quelques années après la canicule de

2003, des forestiers ont été étonnés de constater le reverdissement de certains douglas jugés dépérissants en 2004. Là aussi, l'explication se trouve dans les rameaux épïcormiques : une cime sèche peut être remplacée par un ou plusieurs rameaux épïcormiques identiques à la flèche initiale, et les branches dégarnies ont la possibilité de produire des rameaux épïcormiques similaires aux rameaux sacrifiés.

Le Département Santé des Forêts utilise un protocole de diagnostic visuel appelé DEPEFEU (Dépérissement Feuillus, Nageleisen 2012). Ce protocole est unique pour tous les feuillus, mais ne s'applique pas aux résineux. Il sert à suivre l'évolution sur plusieurs années de l'état des forêts à l'échelle nationale. Il n'a donc pas été conçu pour conseiller les propriétaires sur la gestion immédiate et individuelle des arbres dépérissants.

Les clefs ARCHI sont aujourd'hui disponibles pour six espèces: le chêne pédonculé (Drénou et al. 2011, 2012), le chêne sessile, le chêne pubescent, le châtaignier, le Douglas et le sapin pectiné (Drénou et al. 2013). D'autres espèces viendront progressivement s'ajouter au fur et à mesure de l'avancée des connaissances. L'appropriation et l'utilisation de la méthode nécessite deux conditions préalables : utiliser une bonne paire de jumelles (grossissement de 10) et suivre une formation sur le terrain.

## **Encart 1:**

Témoignage de **Yves LACOUTURE** - Animateur forestier Nord-Charente - C.E.T.E.F. 16  
Juin 2013

### **1- La clef ARCHI des chênes pédonculés est-elle facile à appliquer sur le terrain ?**

Les présentations théoriques d'ARCHI auxquelles j'ai assistée, m'ont paru limpides, illustrées par des cas représentant typiquement les différentes classes décrites dans la méthode. En forêt, les choses se compliquent un peu, surtout à cause des conditions d'observation : peuplements souvent denses, présence de sous-étage, hauteur des arbres... On hésite beaucoup au départ, ne sachant trop ni quoi ni où regarder. Mais une simple demi-journée d'exercices pratiques encadrés, permet d'aboutir à une bonne utilisation et compréhension de la clef. La principale difficulté revient alors seulement à trouver la bonne position permettant d'observer correctement la partie sommitale des arbres...

### **2- Peut-on se servir de la clef ARCHI toute l'année ? :**

Il est évidemment plus simple d'utiliser la clef ARCHI lorsque les arbres ne portent pas leurs feuilles. ARCHI s'appuyant sur l'analyse visuelle de la ramification fine et des gourmands situés dans la partie la plus haute des houppiers, l'automne et l'hiver offrent les meilleures conditions d'observation. L'inconvénient est que dans un peuplement mélangé de chêne pédonculé et de chêne sessile, ARCHI ne s'utilise pas tout à fait de la même manière sur les 2 espèces. Or, les différencier en l'absence de feuillage est un exercice assez délicat.

### **3- Depuis quand utilisez-vous la méthode ARCHI et quelles ont été les évolutions ? :**

Dès 2010, j'ai participé à la mise en pratique de l'outil ARCHI, et j'ai donc eu la chance de suivre ses évolutions. D'une clef qui comportait au départ une quinzaine de types, C. DRENOU et M. BOUVIER ont abouti à un outil qui n'en comporte plus que 5. Les termes employés à chaque étape de lecture de la clef et la définition des différents niveaux d'observation sur l'arbre, ont également été précisés et simplifiés. L'objectif était vraiment d'aboutir à un outil de terrain, facilement utilisable et compréhensible par le plus grand nombre. De ce point de vue, ARCHI est à mon avis une réussite !

### **4- La méthode ARCHI distingue 5 types (sain, stressé, résilient, descente de cime et dépérissement irréversible). Est-ce suffisant pour décrire le développement architectural des chênes pédonculés en forêt ?**

Pour des propriétaires, gestionnaires ou conseillers forestiers, une clef limitée à 5 types est largement suffisante. Pour être utilisée et vulgarisée, la méthode ARCHI doit être simple et rapide à mettre en place. Comme je l'ai dit, c'est à mon avis le cas. Evidemment, il y a toujours des chênes pour lesquels on a l'impression qu'ils se situent entre « deux eaux ». Mais il faut à mon avis ne pas se concentrer sur des cas particuliers, mais utiliser ARCHI pour se faire une idée de la situation globale d'un peuplement.

### **5- La méthode ARCHI vous aide-t-elle à conseiller les propriétaires forestiers ? Avez-vous un exemple ?**

Elle permet clairement d'apporter un élément supplémentaire de diagnostic des peuplements de chêne pédonculé. En ce qui me concerne, c'est même devenu un élément incontournable, voire déterminant dans les conseils que je suis amené à donner aux propriétaires. Dans la région où je travaille, le chêne pédonculé est très abondant dans les espaces boisés forestiers et bocagers. Beaucoup d'agriculteurs, de propriétaires forestiers et même d'élus locaux m'interrogent sur le devenir de ces arbres, qui depuis longtemps leur paraissent en mauvais état. Au-delà des vrais problèmes sanitaires qui impactent

régulièrement ces chênes (chenilles, oïdium, sécheresse...), je n'avais jusqu'à présent que peu d'éléments pour qualifier leur capacité à réagir favorablement ou non à ces stress. J'ai désormais un outil qui par exemple, me permet de leur expliquer pourquoi un arbre « en descente ne cime » n'est ni malade, ni mourant, et qu'il n'y a donc pas de raison de le couper. Dans la mesure où l'importance paysagère et identitaire du chêne pédonculé dans cette région égale largement sa fonction productive, cela donne une perspective bien plus rassurante.

#### **6- Quels sont selon vous les avantages et les limites de cette méthode ?**

Au-delà du simple diagnostic architectural à l'instant « t », ARCHI permet de décrypter le passé d'un chêne, de décrire sa dynamique actuelle, et de pronostiquer son évolution probable, au moins à court terme. C'est plutôt intéressant lorsque l'on a comme objectif la production de bois d'œuvre ! Malheureusement, l'architecture d'un arbre n'est jamais figée : une situation favorable peut évidemment s'inverser, et vice-versa. Différents « marteloscopes » installés en France vont d'ailleurs permettre de suivre l'évolution individuelle de chênes pédonculés, en comparant des modèles avec et sans sylviculture. D'ici 4 ou 5 ans, il sera intéressant de vérifier si les diagnostics et pronostics de départ se sont confirmés ou non. Il est par contre important que chacun comprenne bien que la méthode ARCHI ne caractérise pas l'état sanitaire d'un arbre : elle traduit plutôt sa capacité à pouvoir surmonter une situation ou succession de situations de stress.

#### ***Outil n°4 : l'application DIAGARCHI (DIAGnostic ARCHItectural sur support nomade)***

Les forestiers, et plus généralement tous les gestionnaires d'arbres et d'espaces naturels, ont besoin d'être conseillés avant de prendre des décisions. Ils le sont déjà grâce aux actions d'information et de formation proposées par divers organismes (IDF, CRPF, CETEF, DSF...). Cependant, en dehors du cadre de ces actions, face à des situations souvent singulières, le professionnel se retrouve seul. Il lui manque un outil de diagnostic de l'état et du devenir de ses arbres afin de répondre à plusieurs questions concrètes.

- Quels arbres dois-je regarder en priorité dans un peuplement présentant des signes apparents de dépérissement ?
- Que dois-je regarder dans un arbre ?
- Quel est l'état sanitaire actuel de mon arbre (sain, stressé, résilient ou en dépérissement irréversible)?
- Quel est son avenir à court terme (arbre d'avenir, sans avenir ou à avenir incertain)?

L'outil DIAGARCHI prendra la forme d'une application informatique sur support nomade (de type Smartphone) pouvant fonctionner sans connexion internet, le logiciel étant diffusé par le Web. L'outil fonctionnera sur la base d'une série de requêtes associées à des images et photographies.

Les intérêts sont multiples :

- niveaux d'observations (arbre entier, houppier, tronc...) et nature des observations (mortalité, déficit foliaire, gourmands...) précisés à chaque requête,
- liens automatiques entre les requêtes et les aides iconographiques,
- mémoire de l'historique des questions/réponses pour chaque série de requêtes,
- obtention de scores à l'échelle d'un peuplement.

Simple, rapide, autonome, transportable et disponible à tout moment, l'outil DIAGARCHI répondra à deux objectifs : pédagogique afin de familiariser l'utilisateur aux connaissances morphologiques pré-requises, et technologique afin d'obtenir automatiquement les résultats aux diagnostics. Les utilisateurs potentiels de l'outil sont nombreux : propriétaires forestiers, techniciens forestiers (CRPF, ONF, DSF...), gestionnaires d'espaces naturels, associations de planteurs de haies, paysagistes, services techniques des collectivités territoriales, experts, étudiants, chercheurs, particuliers...

Un prototype du produit a été réalisé pour le sapin sur une plate-forme de description et d'identification de spécimens (XPer2). Un prototype d'application sur Smartphone a été réalisée dans le cadre du projet Pl@ntnet dont l'objectif est l'identification interactive des plantes et le développement de système d'information collaboratif ([www.plantnet-project.org](http://www.plantnet-project.org)). Cette application sera finalisée et testée à court terme.

## Conclusion

L'architecture des arbres est une discipline scientifique présentant plusieurs atouts. Elle traduit l'aspect non linéaire des dynamiques de réaction des arbres face aux stress, elle prend en compte les spécificités botaniques de chaque essence, elle intègre l'observation des rameaux épicorniques, elle permet de porter un pronostic à court terme sur l'avenir des arbres, elle hiérarchise la série d'observations à réaliser sous forme de clés de détermination des types et enfin, elle privilégie l'analyse qualitative sur l'estimation quantitative des symptômes de dépérissement, ce qui lui permet de fortement atténuer les différences d'appréciation entre notateurs.

La validation scientifique des outils présentés dans cet article s'appuie sur trois méthodes. La première, synchronique, consiste à étudier plusieurs dizaines d'individus de tous âges et dans différentes conditions d'environnement afin de pouvoir par comparaison établir les différentes dynamiques de réactions possibles après un stress. La deuxième, rétrospective, s'appuie sur la croissance passée des arbres (étude des cernes par dendrochronologie par exemple). La troisième enfin, chronologique, nécessite la mise en place d'un suivi individuel des arbres année après année. Après de nombreux résultats concluants obtenus avec les deux premières approches (Caraglio et al. 2005, Drénou et al. 2011, Chaubert et al. 2009), c'est vers la troisième, bien que plus difficile à mettre en œuvre, que nous souhaitons à présent nous investir.

Les forestiers commencent à utiliser les concepts issus de l'architecture végétale. Certes, l'évolution des connaissances n'est jamais rapide et les habitudes évoluent tout aussi lentement. Gageons cependant que les outils présentés ici contribuent à rendre plus objectives les décisions à prendre lorsqu'il s'agit d'intervenir sur les arbres.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié des financements des projets OPCC (Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique), RMT Aforce (Réseau Mixte Technologique – Adaptation des forêts au changement climatique) et REINFFORCE (RÉseau INFrastructure de recherche pour le suivi et l'adaptation des FORêts au Changement climatique). Nous remercions M. Guéroult (INRA-AMAP) et F. Pailler (INRA-AMAP) pour leur contribution technique, N. Mariotte (INRA-URFM, Avignon) et H Davi (INRA-URFM, Avignon) pour leur contribution pratique sur le terrain ainsi que L.M. Nageleisen (DSF).

## Références

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.

Barthélémy D., Edelin C., Hallé F. 1989. Architectural concepts for tropical trees. In: *Tropical forests: Botanical dynamics, speciation and diversity*, L.B. Holm-Nielsen and H. Balslev (Eds.), 89-100, Academic Press, London.

Caraglio Y., Drénou C., Nicolini E., 2005. Comment apprécier l'impact d'accidents climatiques sur la croissance des chênes pédonculés ? *Dossier Environnement, GIP-ECOFOR*: 8 p

Chaubert-Pereira F, Caraglio Y, Lavergne C, Guédon Y. 2009. Identifying ontogenetic, environmental and individual components of forest tree growth. *Annals of Botany* 104: 883-896.

de Reffye, P., Dinouard, P., Barthélémy, D., 1991. Modélisation et simulation de l'architecture de l'Orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae): la notion d'axe de référence. Edelin, C. (Ed). *Proceedings of L'Arbre. Biologie et Développement, 2ème Colloque International sur l'Arbre*. Montpellier, France : 251-266. *L'Arbre. Biologie et Développement, 2ème Colloque International sur l'Arbre, 9-14/09/1990, Montpellier, France.*

de Reffye, P., Blaise, F., 1993. Modélisation de l'architecture des arbres : applications forestières et paysagères. *Revue Forestière Française*, 45 : 128-136.

Drénou C., Bouvier M., Lemaire J., 2011. Méthode de diagnostic ARCHI : application aux chênes pédonculés dépérissants. *Forêt Entreprise*, 200, 4-15.

Drénou C., Giraud, F. Gravier H., Sabatier S. et Caraglio Y. 2013. Le diagnostic architectural : un outil d'évaluation des sapinières dépérissantes. *Forêt Méditerranéenne*, tome XXXIV n°2. 87-98.

Drénou C., Bouvier M., Lemaire J., 2012. Rôles des gourmands dans la résilience des chênes pédonculés dépérissants. *Forêt Wallonne* n° 116 – janvier/février 2012.

Edelin C, 1977. Images de l'architecture des conifères. Doctorat, UM2, Montpellier, 278 p.

Hallé F., Oldeman RAA. 1970. Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux. Masson et Cie, Paris, 178 p.

Nageleisen L.-M 2012. Guide de notation de l'aspect du houppier des arbres feuillus dans un contexte de dépérissement. Protocole DEPEFEU. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt, DGAL –DSF, 17 p.

Oldeman RAA, 1974. L'architecture de la forêt guyanaise, Mémoire ORSTOM, n° 73, 204 p.

Pavie A., Bruno E., Dumé G., Drénou C., Lemaire J., Torre F., 2008 – Guide des sylvicultures du châtaignier en Castagniccia. CETEF-CRPF de Corse, 130 p.

## **Encart 2: Lexique des termes utilisés**

*Age d'un méristème* : 3 sortes d'âge : âge chronologique d'un méristème se réfère à la période pendant laquelle se met en place une entité botanique ; âge ontogénique est le temps écoulé depuis la germination; âge physiologique se réfère au degré de différenciation des structures qu'il a produit.

*Amphitonie* : les rameaux avec un grand diamètre sont répartis sur la partie latérale des branches.

*Architecture végétale* : cette expression désigne la série des caractères structuraux exprimée par une plante au cours de son développement (ontogénie) mais aussi la méthode d'étude de l'organisation spatio-temporelle de la structure végétale.

*Cime d'un arbre* : sommet du houppier.

*Développement monopodial* : la croissance d'un axe est assurée de façon indéfinie par le même méristème ou bourgeon apical.

*Développement sympodial* : la construction d'un axe est assurée par une succession de segments superposés provenant de bourgeons latéraux différents.

*Epitonie* : les rameaux avec un grand diamètre sont répartis sur la partie supérieure des branches.

*Hypotonie* : les rameaux avec un grand diamètre sont répartis sur la partie inférieure des branches.

*Houppier hors concurrence* : Partie supérieure du houppier, « à la lumière », excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence. Situé au-dessus de la ligne joignant les contacts latéraux avec les voisins.

*Méristème* : zone apicale dans le bourgeon où s'effectue la division cellulaire.

*Métarmorphose architecturale* : transformation progressive de la structure de l'arbre au cours de sa vie.

*Polycyclisme* : la pousse annuelle est composée de 2 ou plusieurs unités de croissance.

*Pousse annuelle* : portion de tige mise en place au cours d'une saison de végétation.

*Rameau épicornique* (gourmand, rejet ou suppléant) : rameau se développant à partir d'un bourgeon latéral dormant sur le tronc ou sur des branches maîtresses.

*Rameaux immédiats ou à développement immédiat* : les rameaux se développent sur la pousse qui est en train de s'allonger et sont généralement localisés au milieu de cette pousse porteuse.

*Rameaux différés d'un an ou à développement différé d'un an* : les rameaux se développent l'année suivant l'allongement de la pousse porteuse.

*Réitération* : processus de duplication d'une structure existante qui concerne une partie de l'UA, par exemple les branches (*Réitération partielle*) ou l'ensemble de l'UA (*Réitération totale*) Le complexe réitéré s'établit en même temps que la structure porteuse, (*Réitération immédiate*) » ou avec un délai de plus de 2 ans par rapport à la structure porteuse (*Réitération retardée*).

*Unité architecturale (UA)* : Chaque espèce végétale possède un nombre fini de catégories d'axes. L'ensemble de ces catégories aux fonctions précises, constituent l'Unité Architecturale de l'espèce.

*Unité de croissance* : portion de tige mise en place au cours d'une période d'allongement ininterrompue.

*Unité minimale* : système ramifié réduit ultime.

## **Légende des Figures**

Figure 1. Séquence de développement du Chêne pédonculé: 1. Jeune arbre conforme à son unité architecturale. Le contour du houppier est pyramidal. La pousse annuelle est constituée de 2 à 4 unités de croissance ; 2. Arbre adulte et construction de sa cime. Trois séries de fourches successives sont visibles dans la partie haute du tronc. La cime s'arrondit. La pousse annuelle est constituée de 2

unités de croissance. 3. Arbre mature et homogénéisation des structures mise en place à la périphérie du houppier. Mortalité des branches du bas du houppier et mise en place de rameaux épitones. La pousse annuelle est constituée d'une unité de croissance. 4. Arbre sénéscent et invasion progressive par la mortalité sans possibilité de compensation par la réitération retardée. La pousse annuelle est de petite taille (unité minimale) sans polycyclisme et non ramifiée. Dessins originaux : Ch. Drénou.

Figure 2. Exemple de marqueurs architecturaux de la réactivité d'un arbre : la structure des pousses annuelles chez le Châtaigner. Chez cette essence, une pousse annuelle est constituée de cinq zones morphologiques. Zone I : zone basale stérile portant des bourgeons latents ; Zone II : zone portant des chatons mâles ; Zone III : zone médiane stérile portant des bourgeons latents ; Zone IV : zone produisant les châtaignes ; Zone V : zone apicale portant des bourgeons qui se développeront en axes l'année suivante. L'ordre de ces zones est invariable. En revanche, le nombre de zone diminue avec la vitalité. Ainsi, à la cime de ce châtaignier mature, deux types de pousses sont visibles : des pousses annuelles à 4 zones issues des axes séquentiels (à droite) et des pousses annuelles à 5 zones issues de rameaux épécormiques (à gauche). Cette différence atteste que l'arbre possède encore une bonne capacité à réagir aux perturbations de l'environnement. Schéma : A. Pavie. Photos : Ch. Drénou.

Figure 3. Exemples de marqueurs architecturaux de la réactivité du sapin pectiné adulte: la réduction prématurée de la taille des pousses annuelles et le tassement des étages de branches le long du tronc. Pour un même stade de développement, on observe soit la mise en place d'un relai par le redressement d'une branche (arbre de gauche), soit la persistance d'une croissance réduite (arbre du milieu) ou soit la transformation du tronc initial en branche (arbre de droite) suite à une réduction prématurée de la croissance annuelle. Cela traduit une capacité de réaction de l'arbre décroissante de la gauche vers la droite.

Figure 4. Clé ARCHI d'aide au diagnostic du dépérissement chez le Douglas.

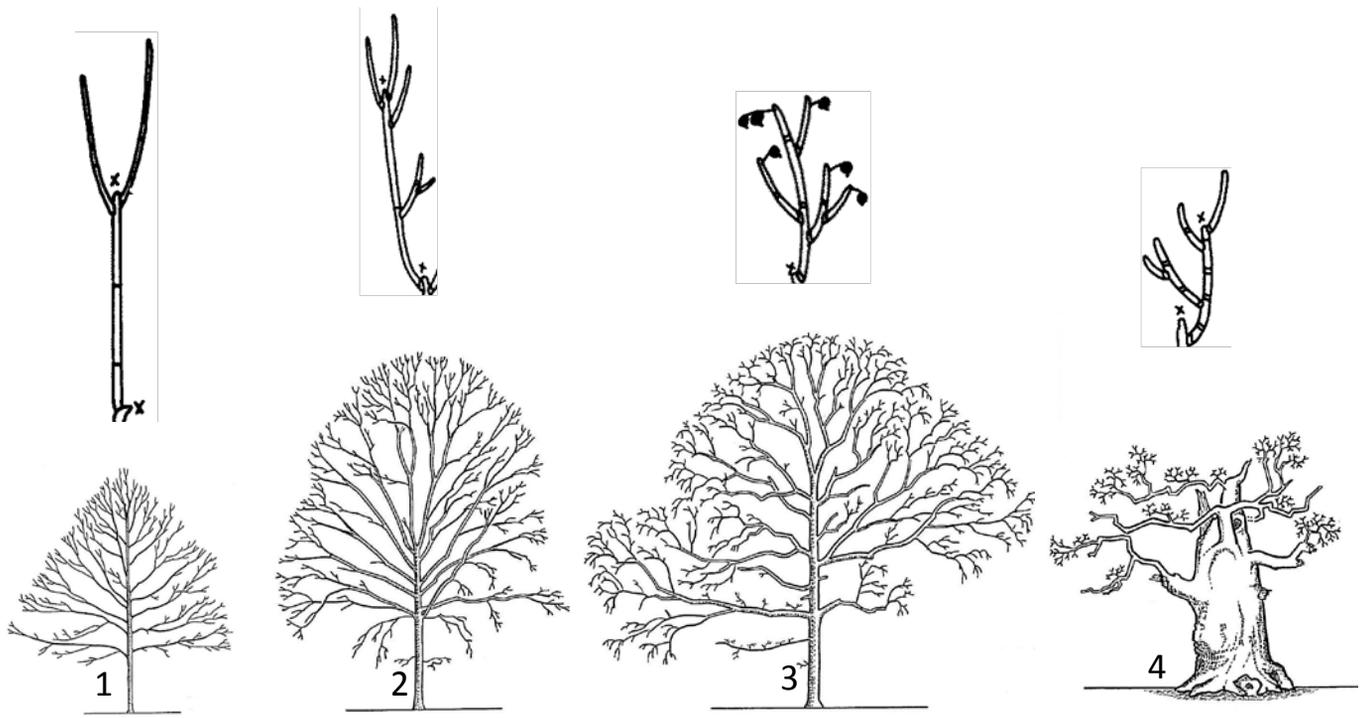


Figure 1

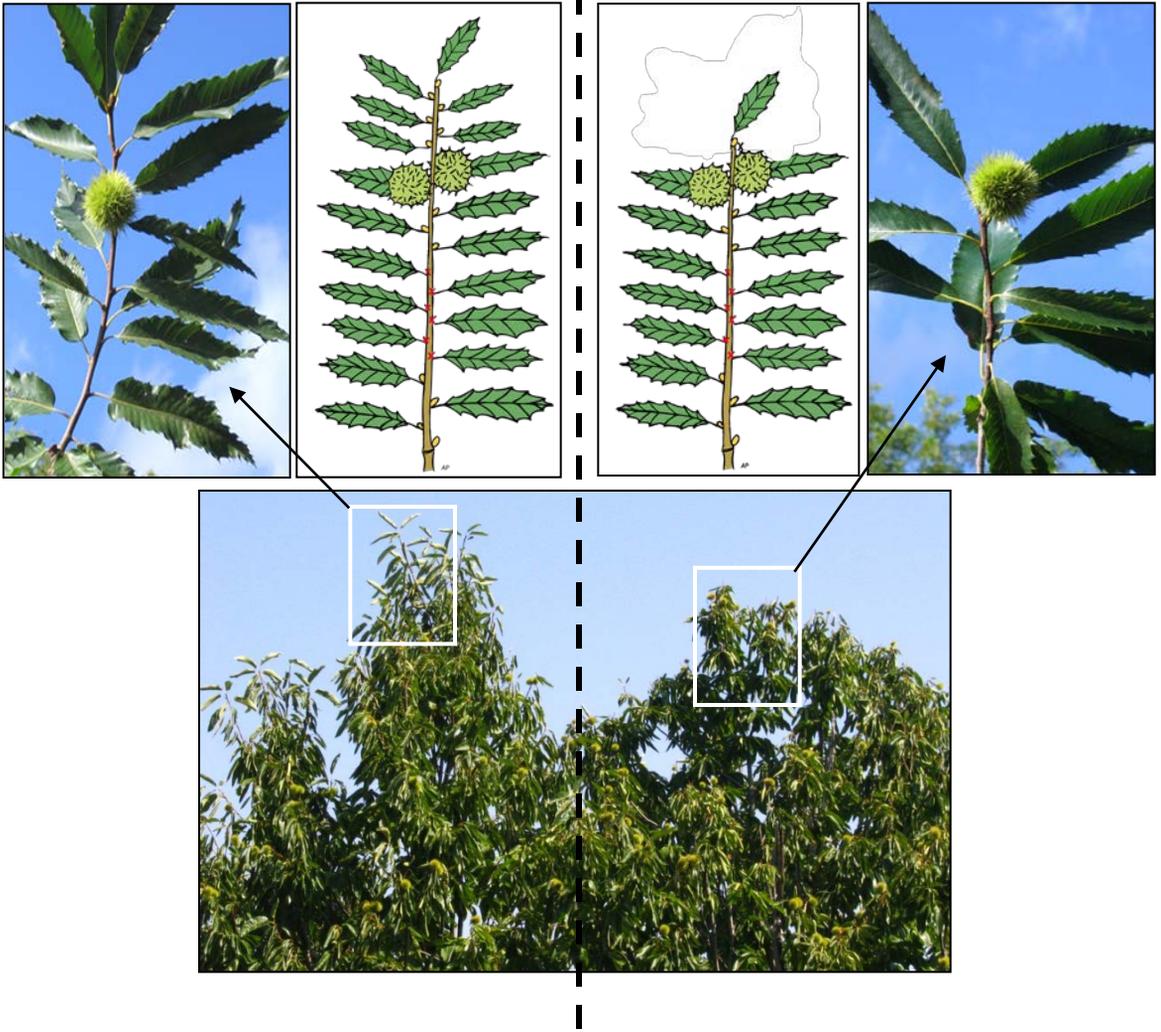


Figure 2

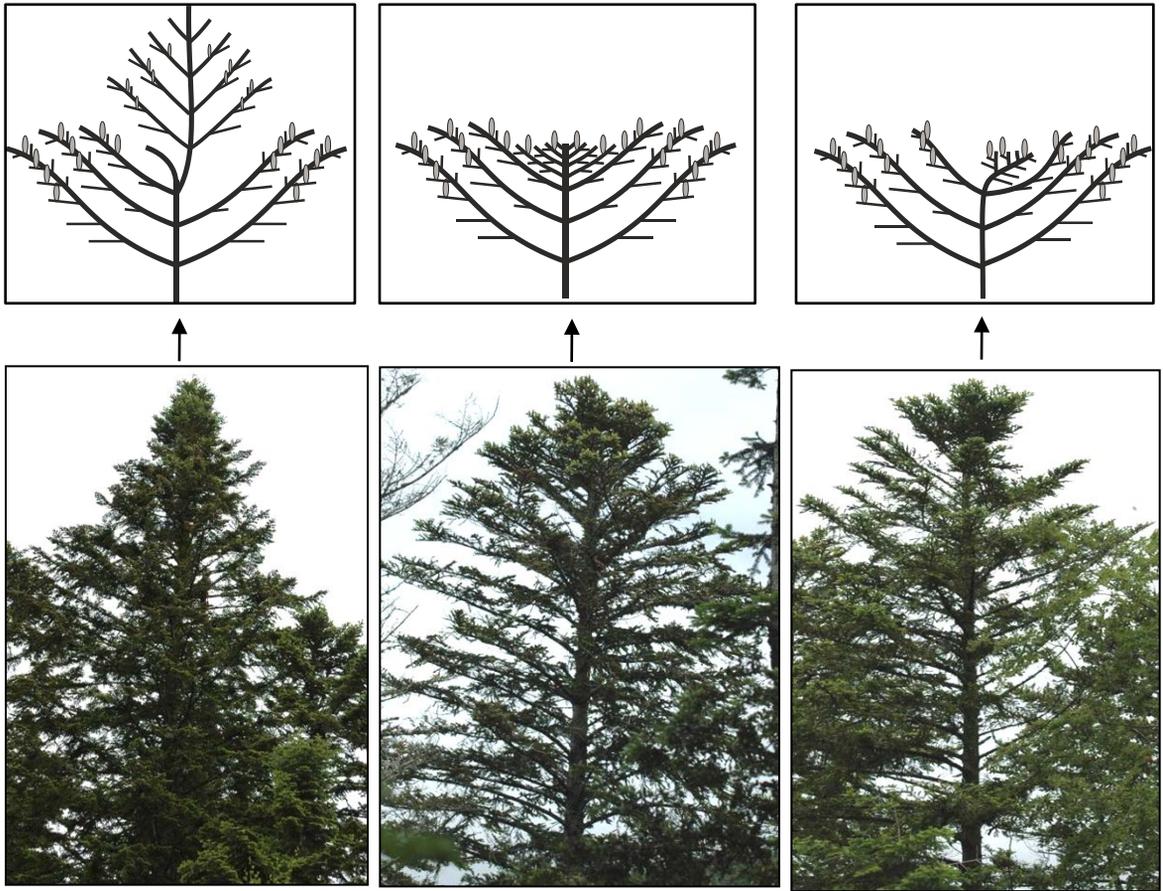
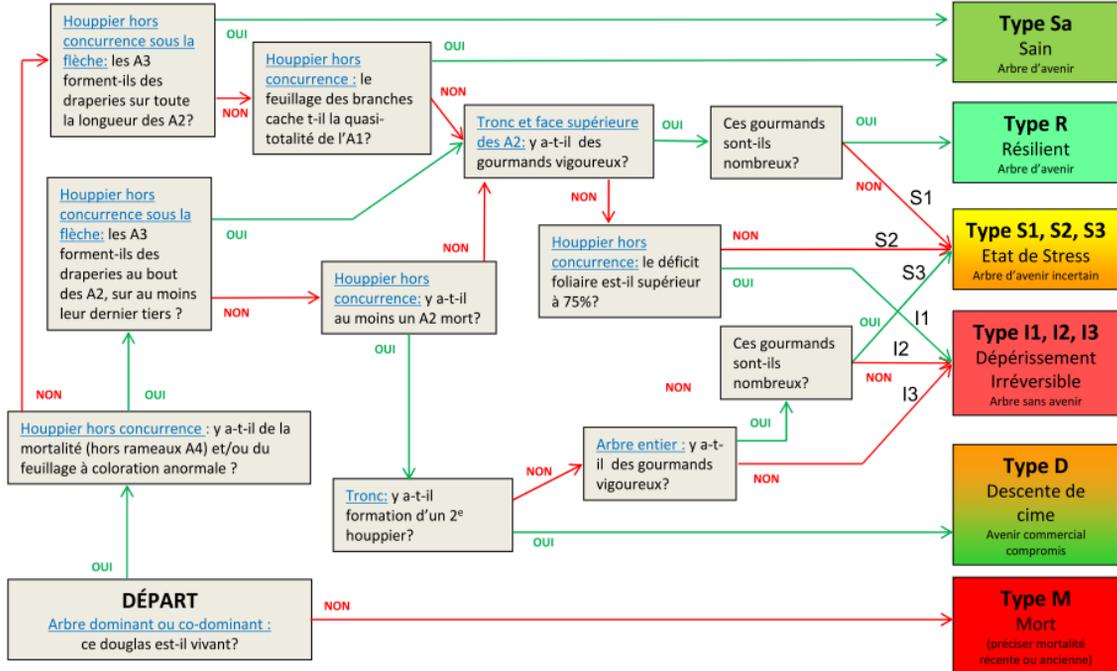


Figure 3

**Clé de détermination des types ARCHI chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)**

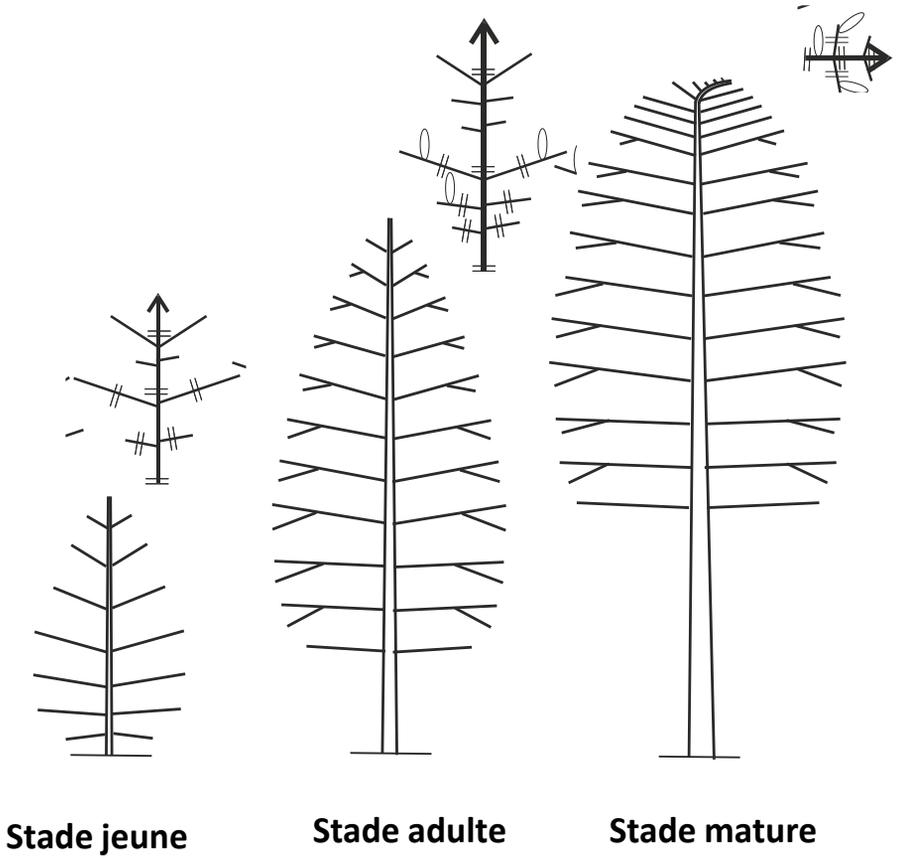


**Houppier hors concurrence** : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.  
**Flèche** : partie sommitale du tronc comprenant les six derniers étages de branches.  
**A1, A2, A3, A4** : le tronc est l'axe d'ordre 1 (A1), il porte des étages de branches appelées A2, et ainsi de suite. L'ordre de ramification du douglas est de 4.  
**Gourmands vigoureux** : gourmands plagiotropes ou orthotropes présentant une forte dominance apicale (existence d'un axe principal dominant), une forte croissance (net espacement entre les étages de ramifications), et une sexualité absente ou limitée à quelques cônes femelles.  
**Gourmands nombreux** : gourmands présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.  
**2e houppier** : structure constituée de gourmands vigoureux portés par le tronc et hiérarchisés entre eux (certains étant dominants, d'autres dominés).

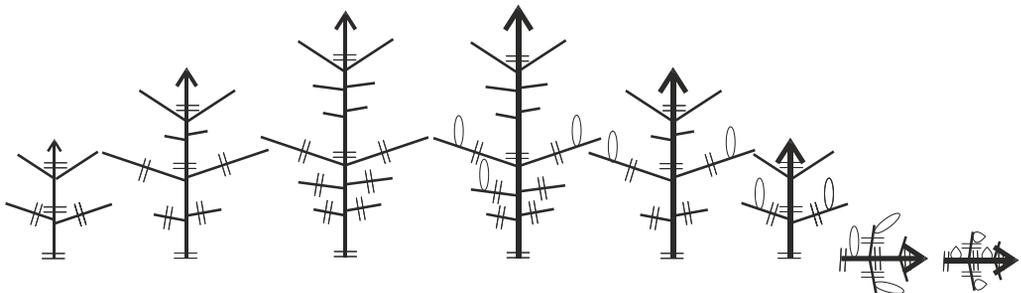
Figure 4

# Diagnostic ontogénique d' *Abies alba*

## Séquence de développement et structure des pousses annuelles

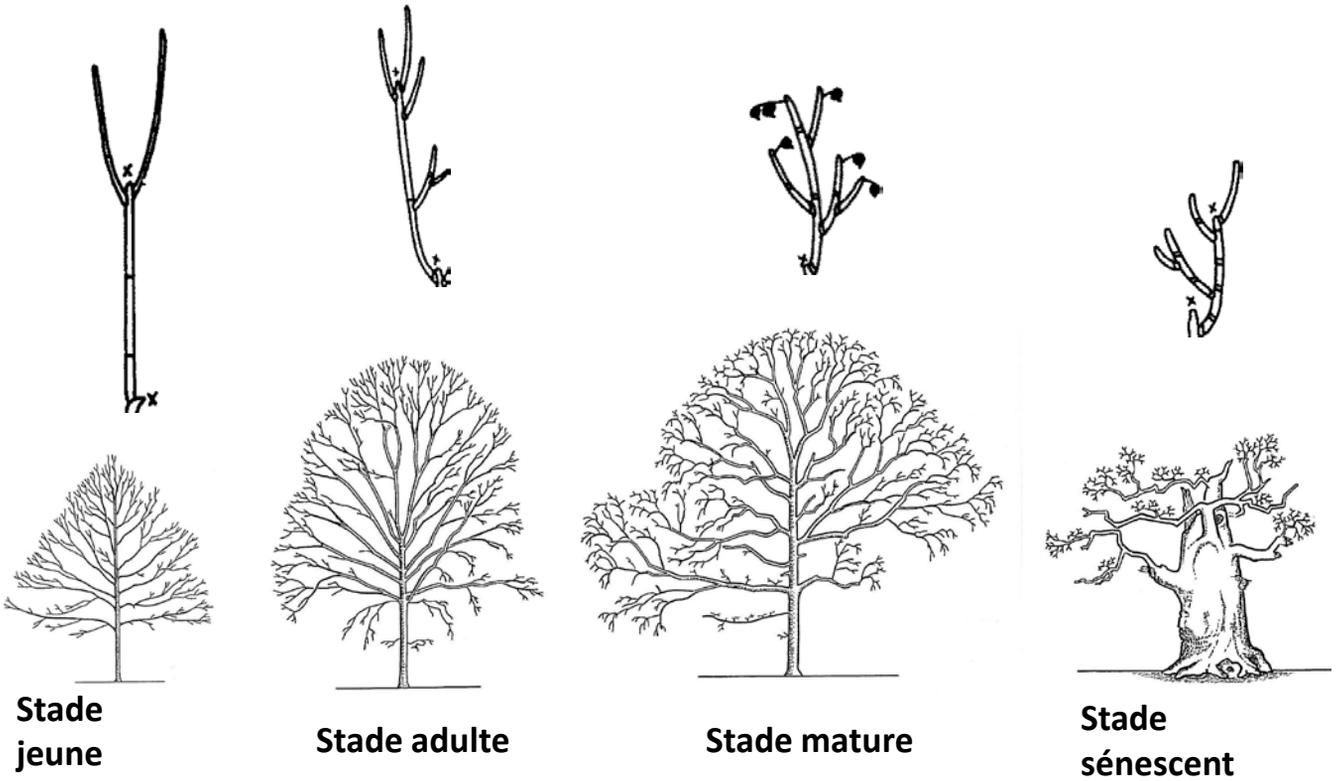


## Indicateur de croissance des axes

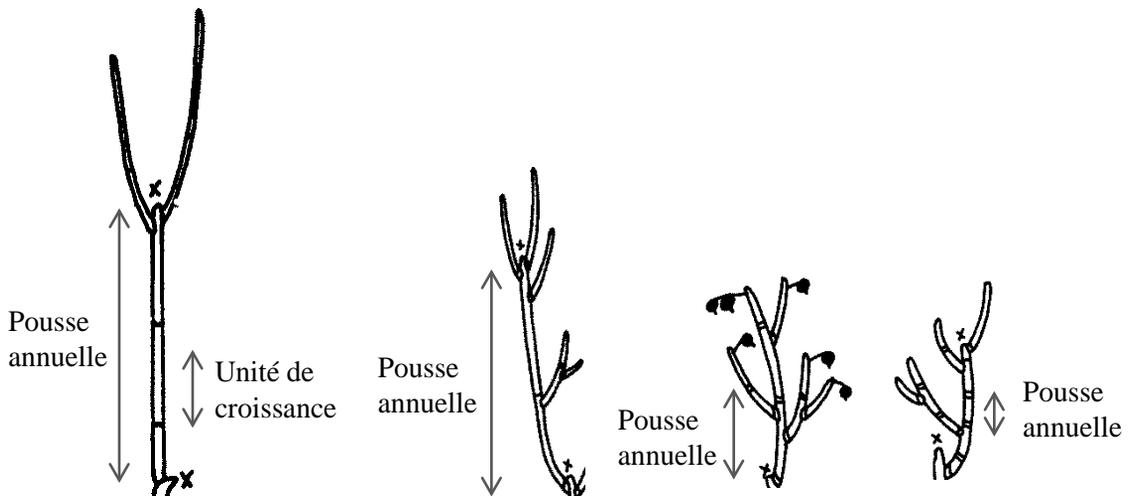


# Diagnostic ontogénique de *Quercus robur*

## Séquence de développement et structure des pousses annuelles



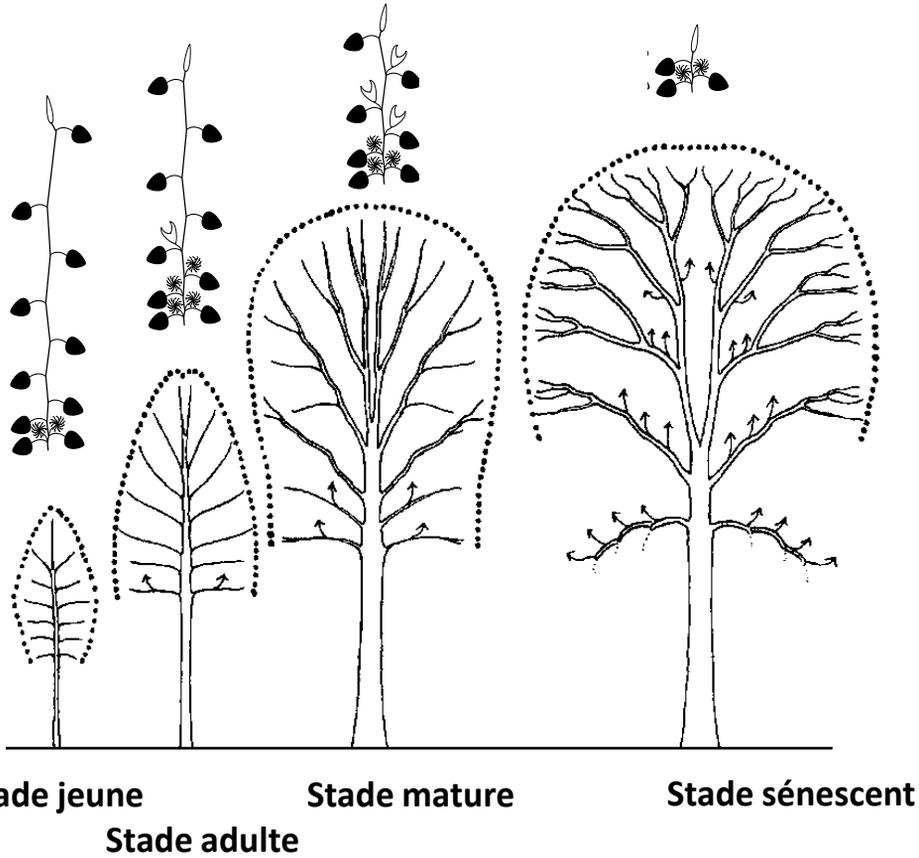
## Indicateur de croissance des axes



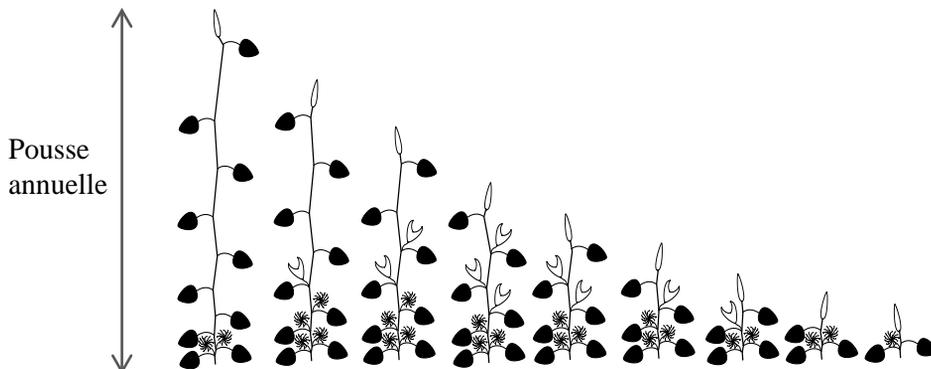
# Diagnostic ontogénique de *Fagus sylvatica*

d'après Nicolini 1997

## Séquence de développement et structure des pousses annuelles

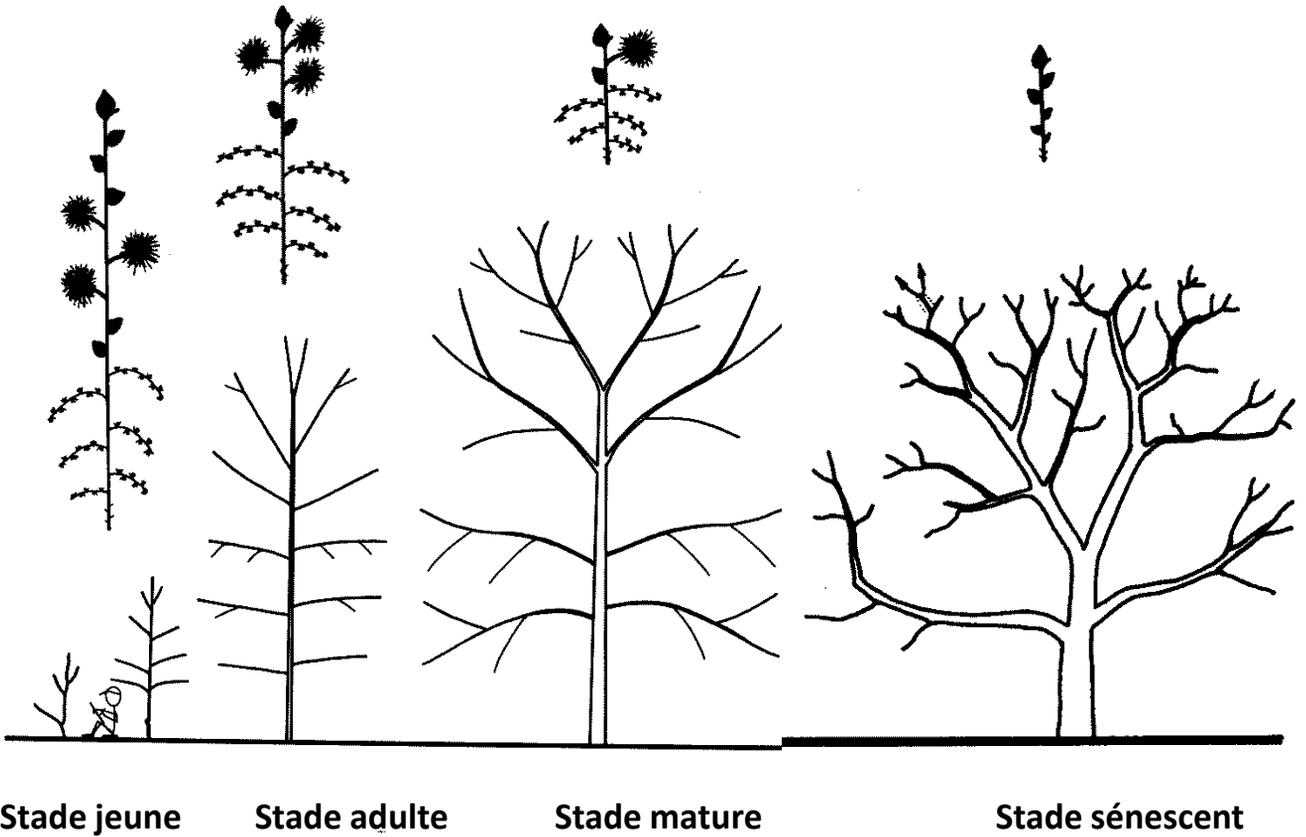


## Indicateur de croissance des axes

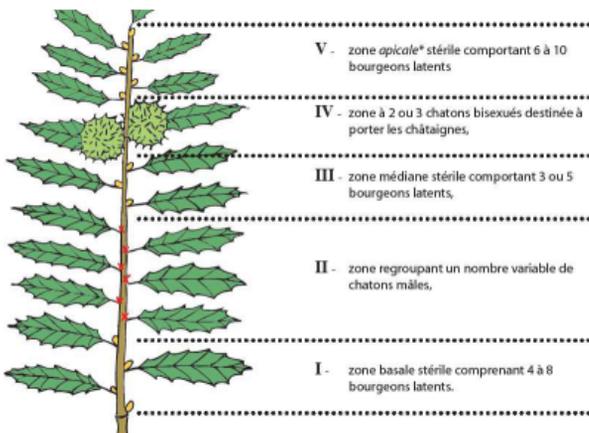


# Diagnostic ontogénique de *Castanea sativa*

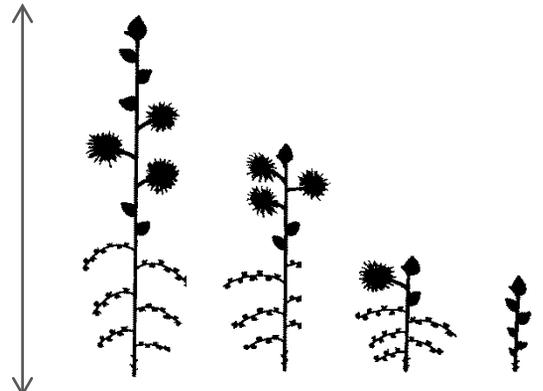
## Séquence de développement et structure des pousses annuelles



## Indicateur de croissance des axes

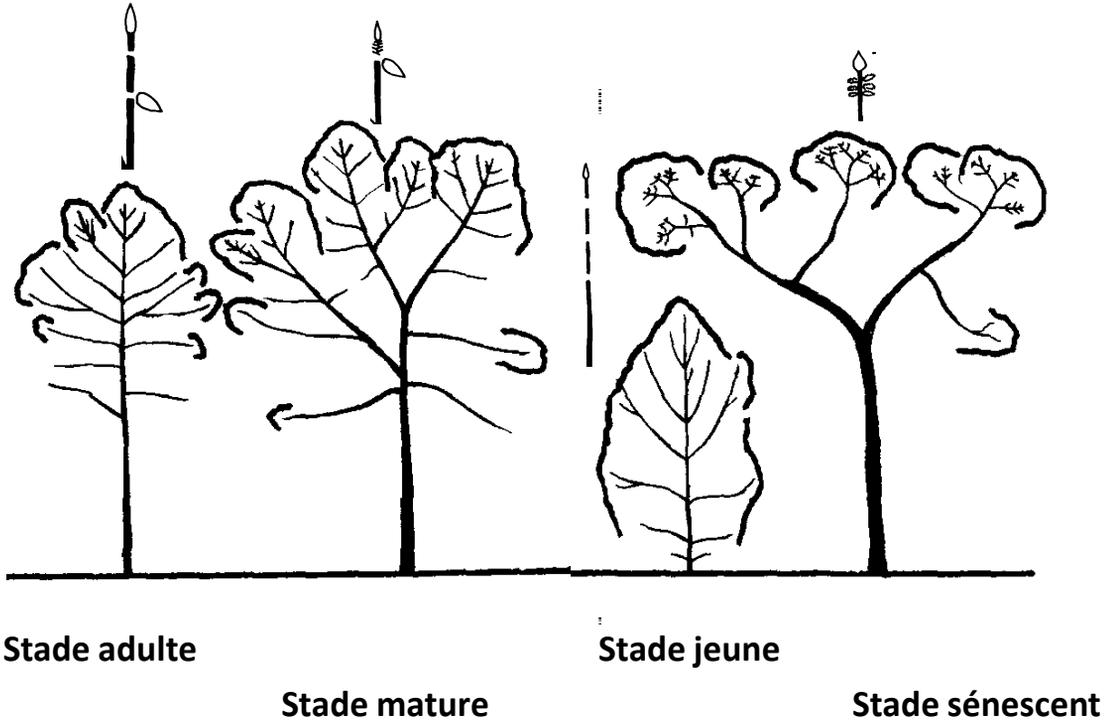


Pousse annuelle

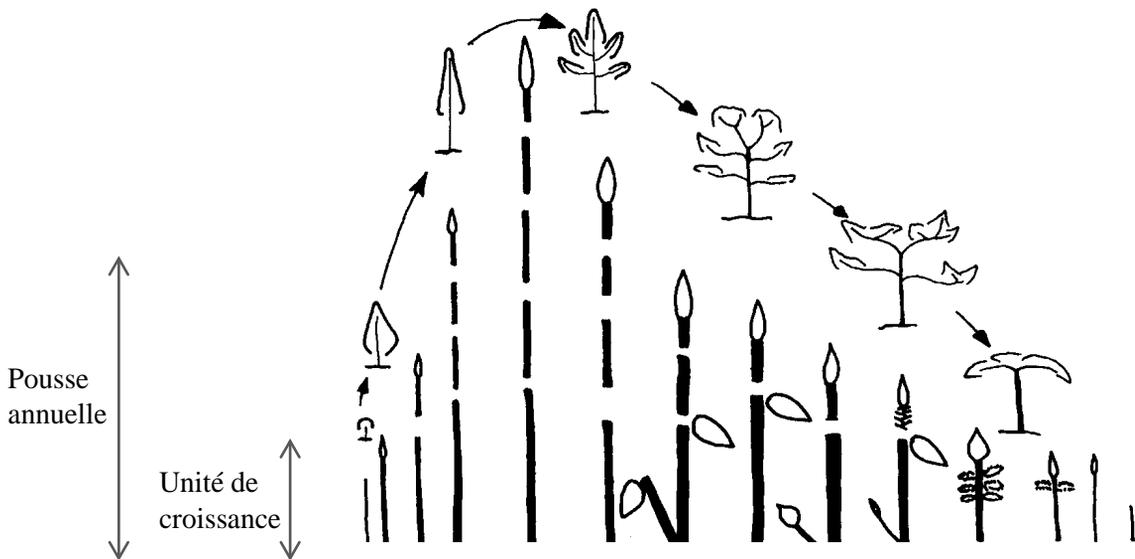


# Diagnostic ontogénique de *Pinus halepensis*

## Séquence de développement et structure des pousses annuelles

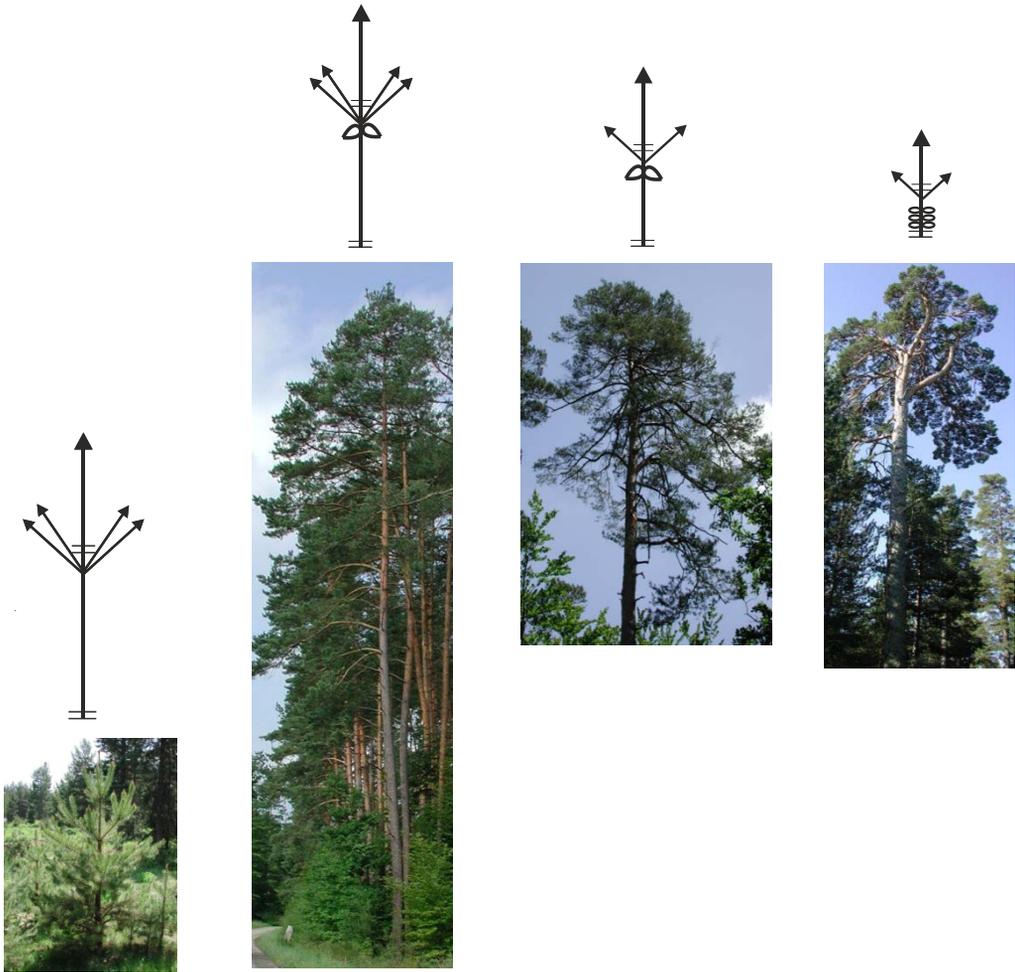


## Indicateur de croissance des axes



# Diagnostic ontogénique de *Pinus halepensis*

## Séquence de développement et structure des pousses annuelles



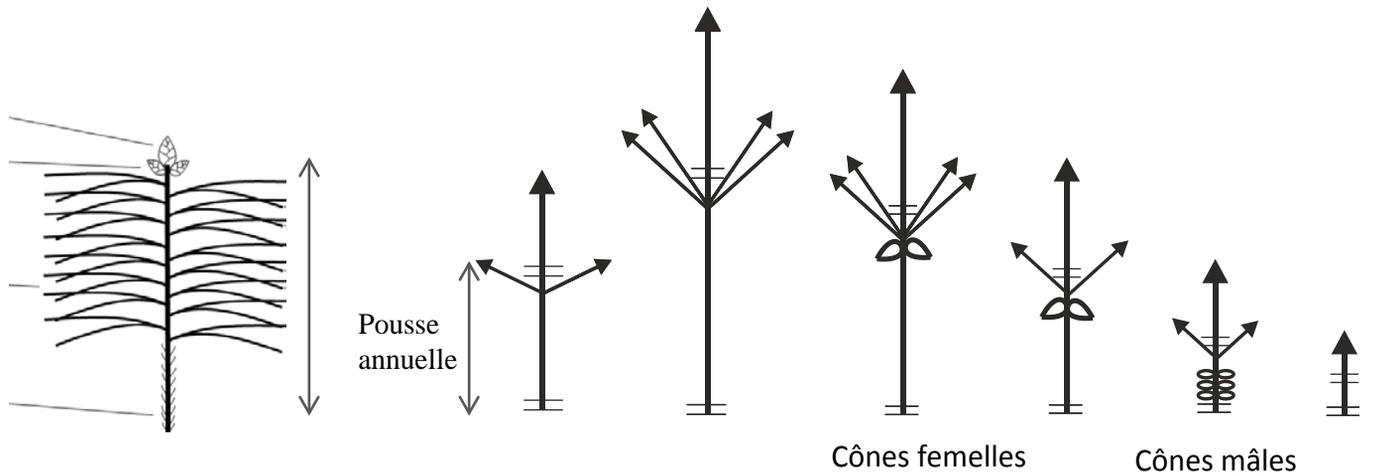
**Stade jeune**

**Stade adulte**

**Stade mature**

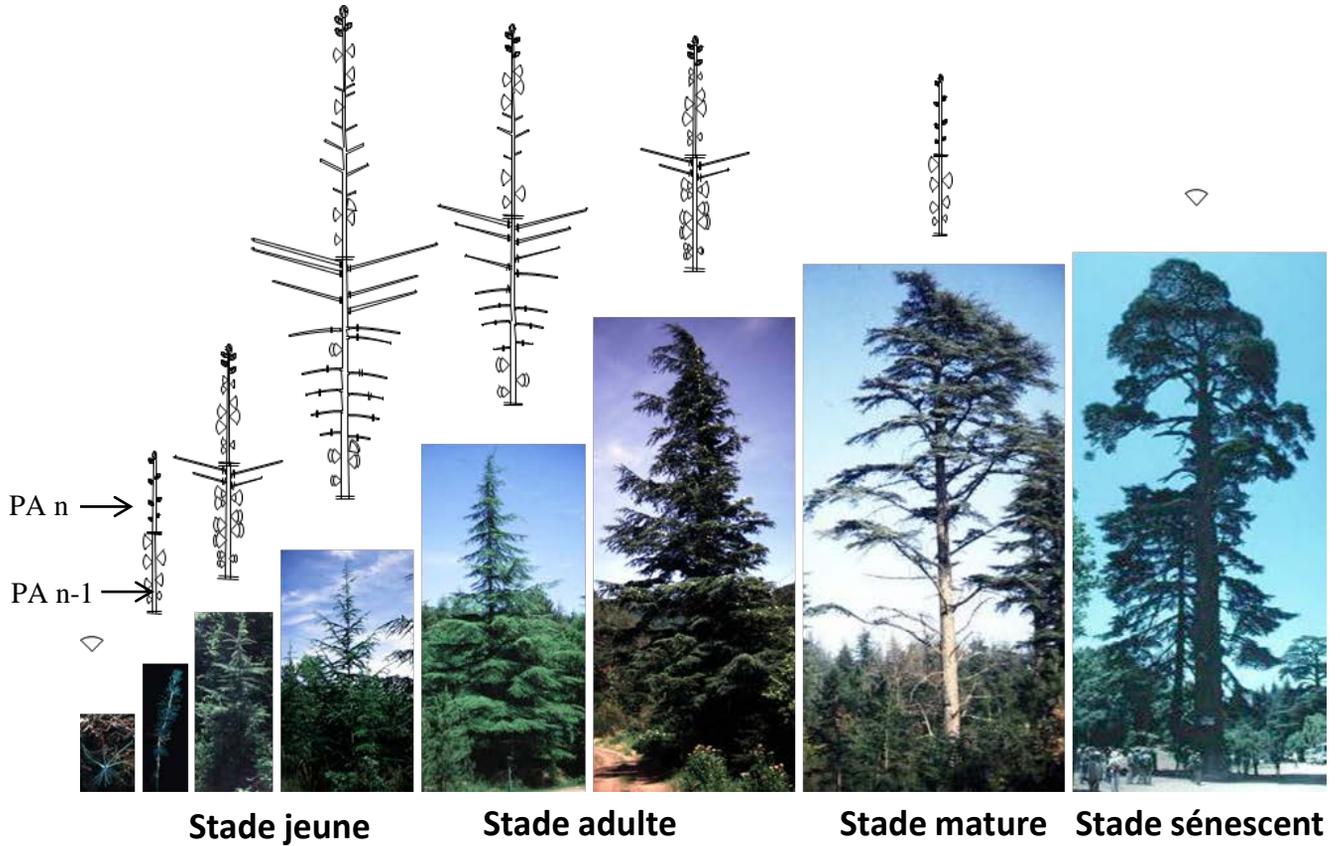
**Stade sénéscent**

## Indicateur de croissance des axes

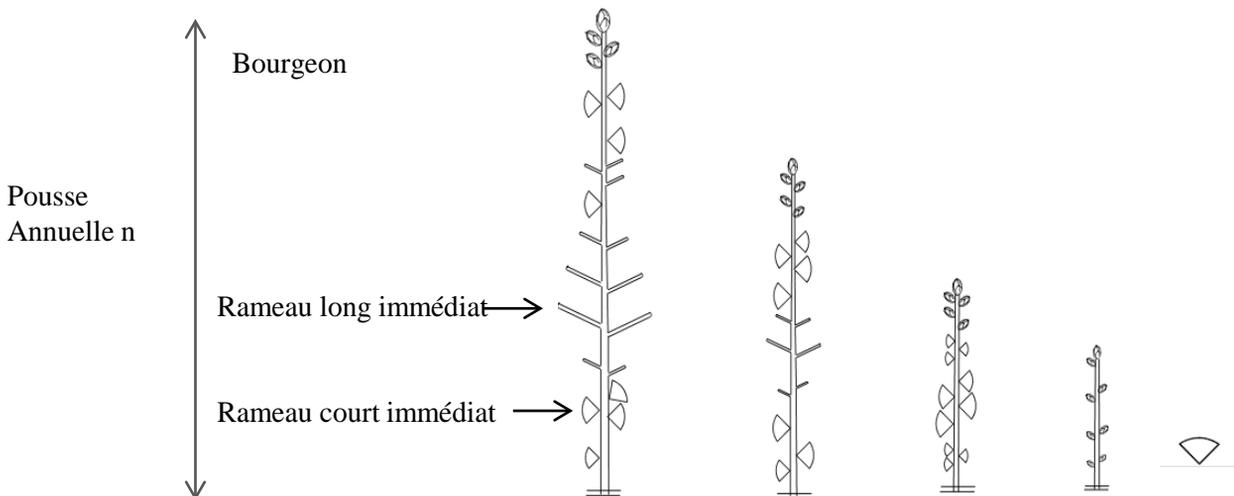


# Diagnostic ontogénique de *Cedrus atlantica*

## Séquence de développement et structure des pousses annuelles



## Indicateur de croissance des axes

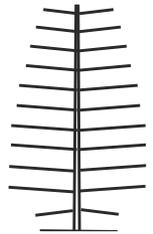


# Diagnostic architectural d' *Abies alba*

## Arbre jeune

## Arbre entier

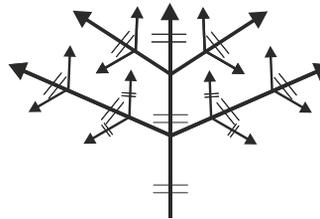
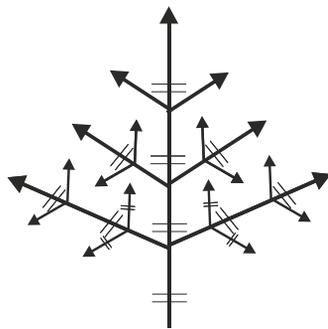
### Houppier notable



### Houppier notable

*Arrêt temporaire du méristème édificateur*

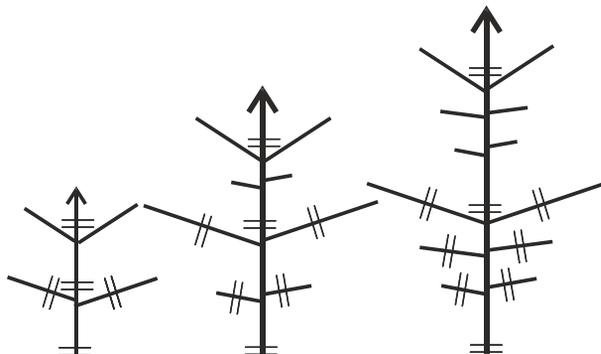
### Système ramifié



### Cime

### Pousse annuelle

*Vitalité de l'arbre*

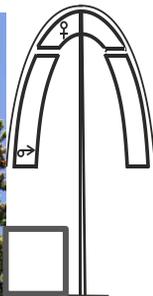
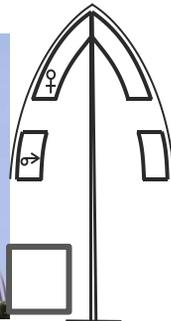


# Diagnostic architectural d' *Abies alba*

Arbre adulte

Arbre entier

Cime



Zones femelle/mâle

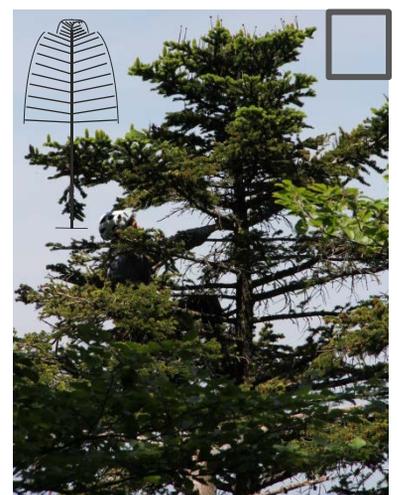
Fructification : moyenne



très abondante



Houppier notable



Tassement des étages de branches

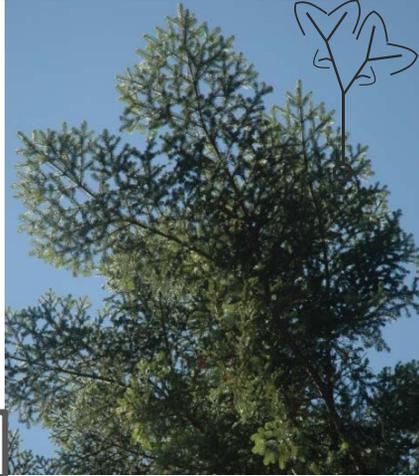
Tronc et branches basses



Taille des épicorniques

Houppier notable

Structure séquentielle des branches



Durée de vie des feuilles ou nombre de pousses annuelles successives feuillées

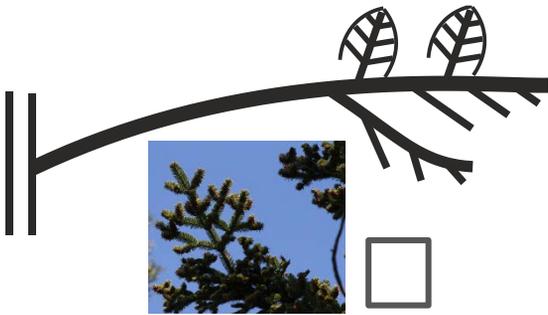
Tronc : < 5

≥ 5

branches: < 10

≥ 10

Tronc et branches basses

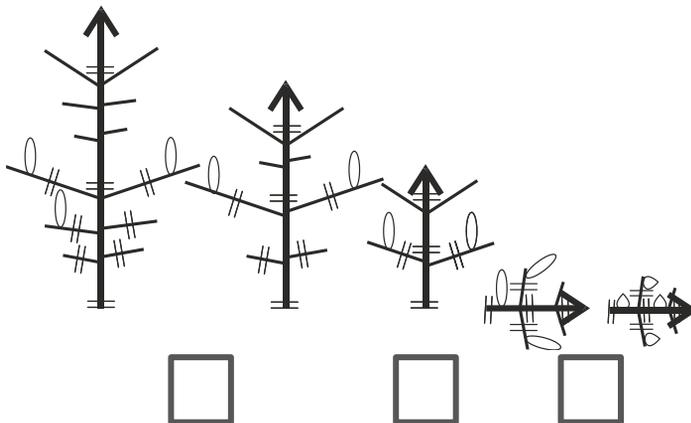


Taille des épïcormiques

Cime

Pousse annuelle

Vitalité de l'arbre

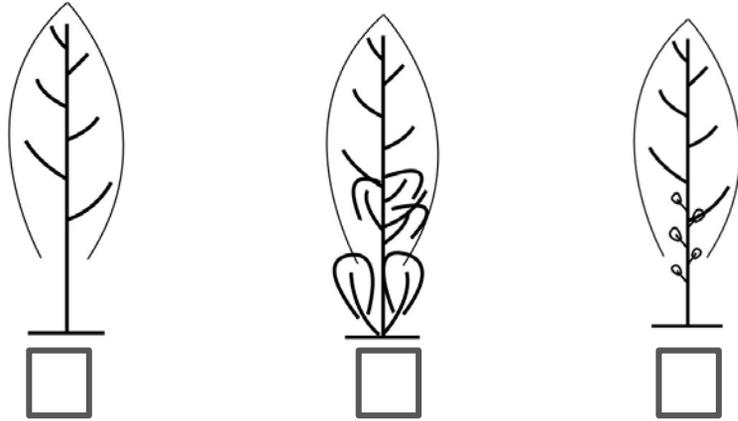


# Diagnostic architectural *Quercus robur*

## Arbre jeune

Arbre entier

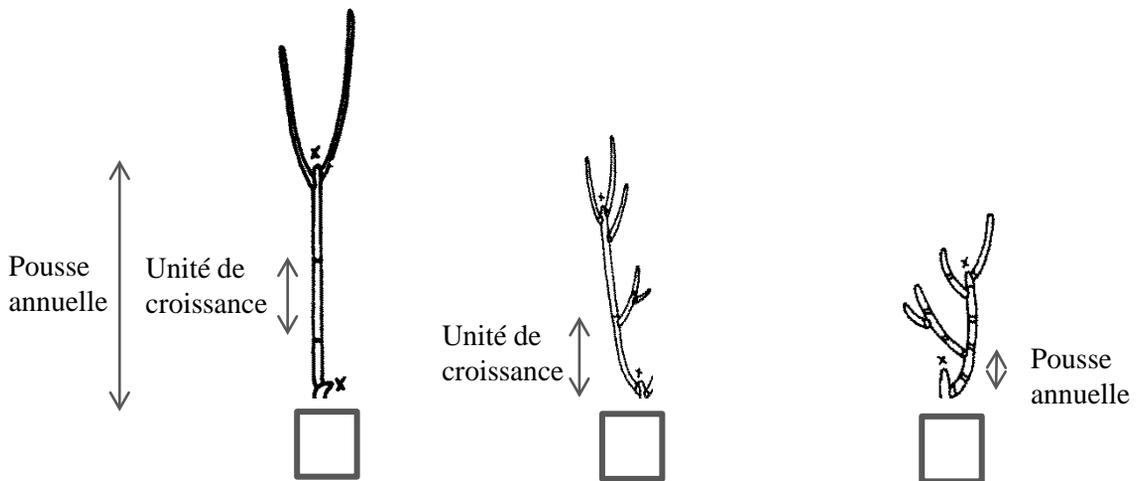
Houppier hors concurrence



Présence de rmx épïcormiques à la base du houppier ou du tronc

Pousse annuelle

Cime



Nb. d'UC et taille:

3 UCs

2 UCs

1 UC

# Diagnostic architectural *Quercus robur*

(d'après Drénou et al. 2011)

Arbre entier

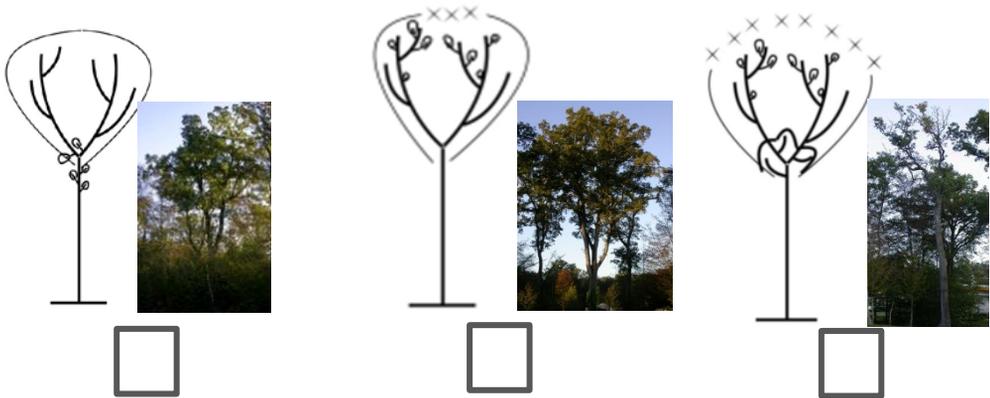
Cime

mortalité



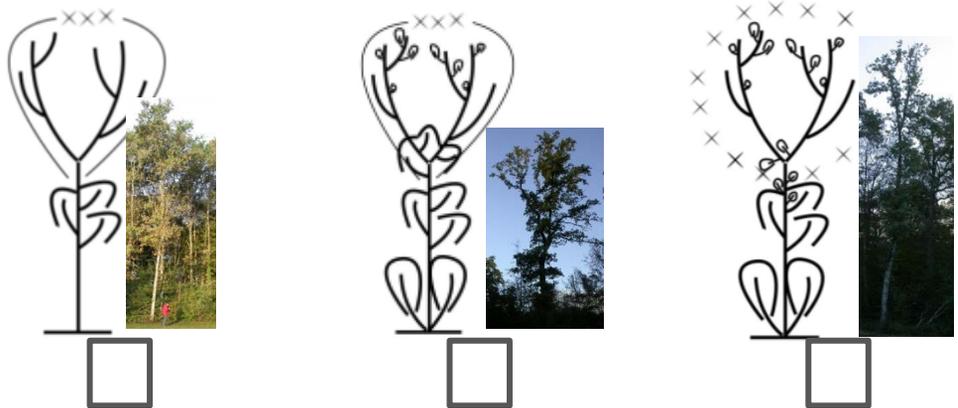
Houppier hors concurrence

Localisation des  
rmx épïcormiques

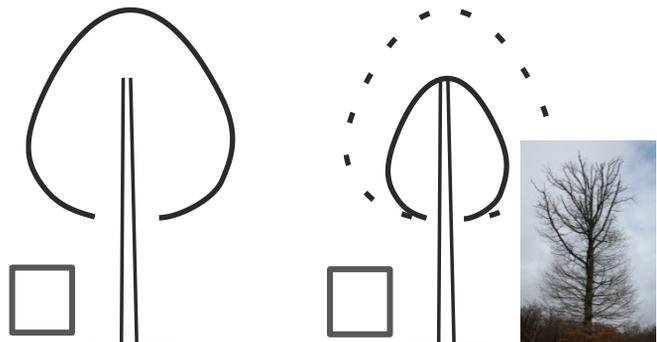


Tronc et branches basses

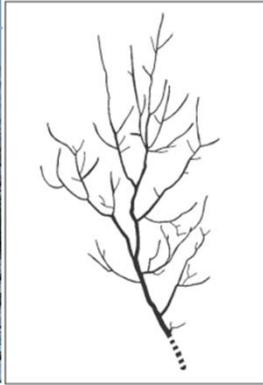
Localisation des  
rmx épïcormiques



Formation d'un deuxième houppier  
Ou descente de cime



Cime



Dense et complexe

Claire et appauvrie

Houppier hors consurrence

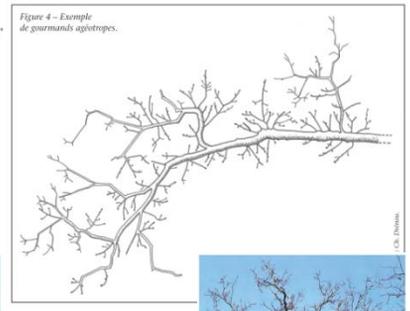
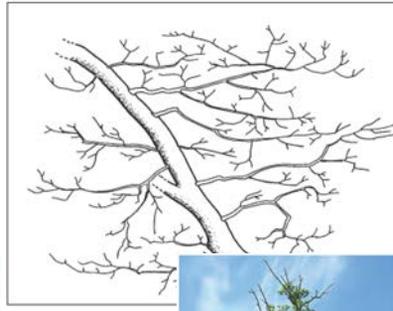
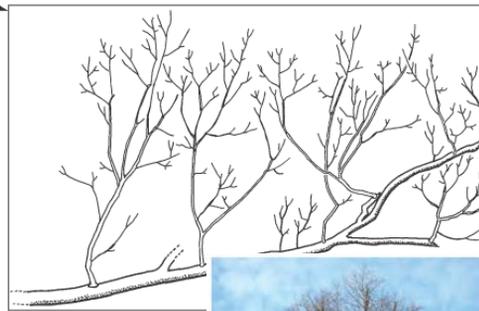
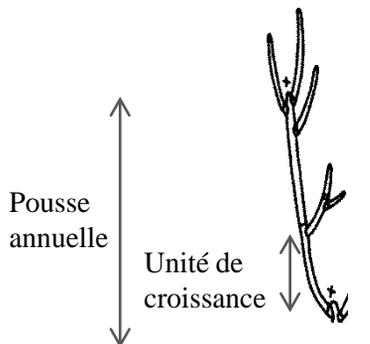


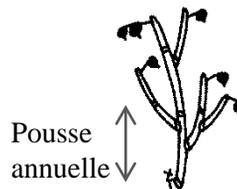
Figure 4 - Exemple de gourmands agiotropes.

Pousse annuelle

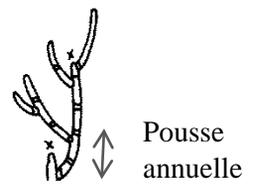
Cime



2 UCs



1 UC



2 UC



Nb. d'UC et taille:

# Diagnostic architectural *Fagus sylvatica*

Arbre adulte

Arbre entier

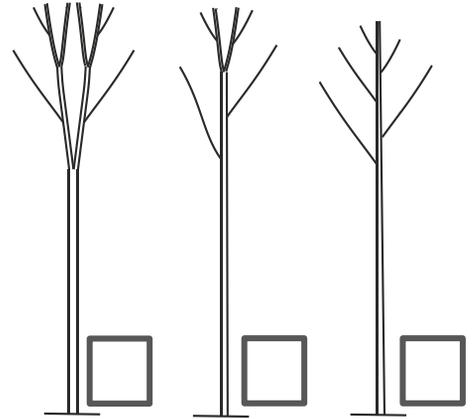
Cime



*Croissance annuelle en hauteur homogène*

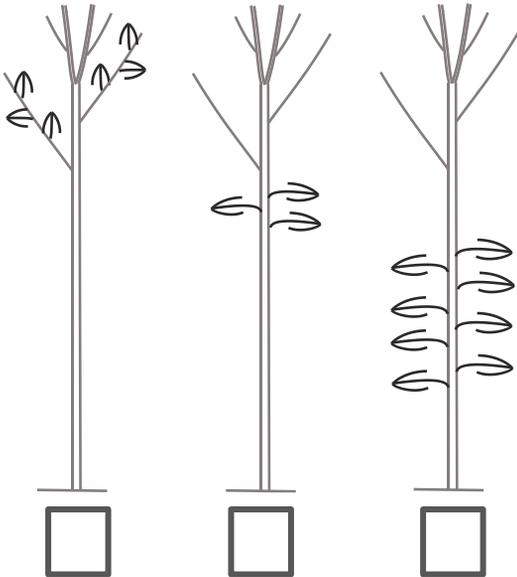
*hétérogène*

Houppier hors concurrence

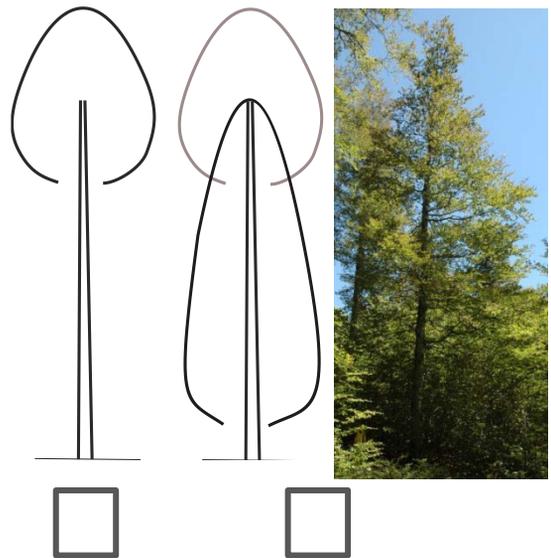


*Nb. de fourches (degré de réitération)*

Tronc et branches basses



*rmx épïcormiques: localisation*



*Organisation: deuxième houppier*

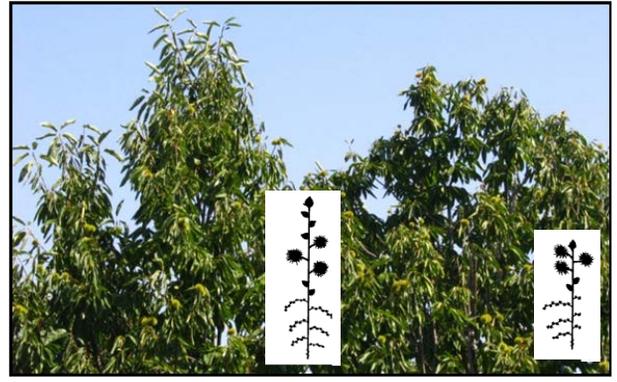


# Diagnostic architectural *Castanea sativa*

## Arbre adulte

### Arbre entier

#### Cime

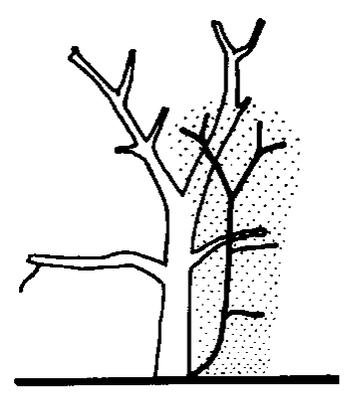
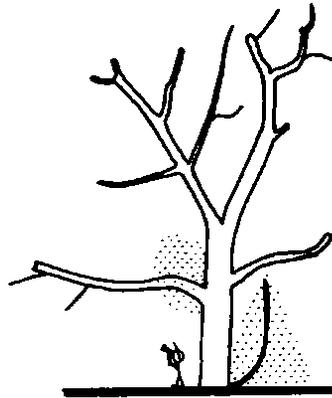
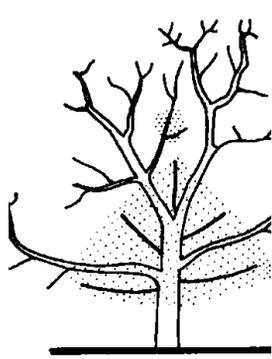
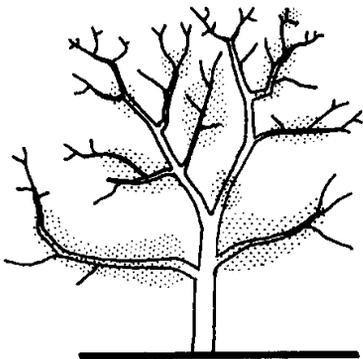


Structure : 1 type de pousse annuelle

2 types de pousses annuelles



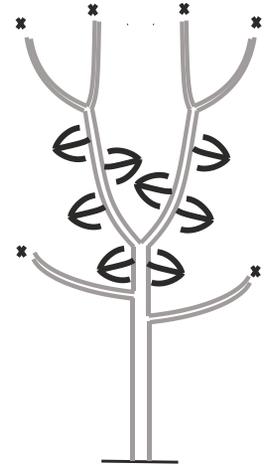
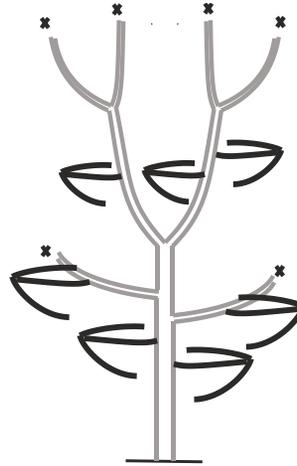
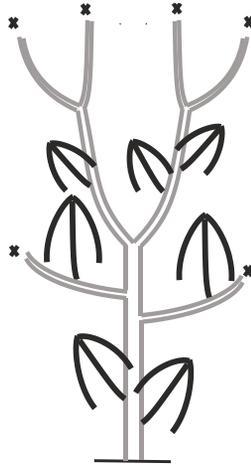
#### Tronc et branches basses



Localisation des rmx épïcormiques

# Système ramifié

## Tronc et branches basses



Direction de croissance des rmx épïcormiques:

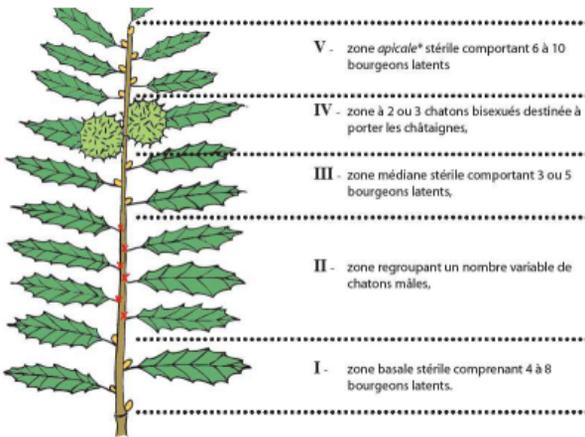
Orthotropes

Plagiotropes

Agéotropes

# Pousse annuelle

## Cime



Nombre de zones:

5

4

3

1

## Tronc et branches basses

rmx épïcormiques: nb. de zones

5

4

3

1

# Diagnostic architectural *Pinus Halepensis*

## Arbre adulte

Arbre entier

Cime



Cime

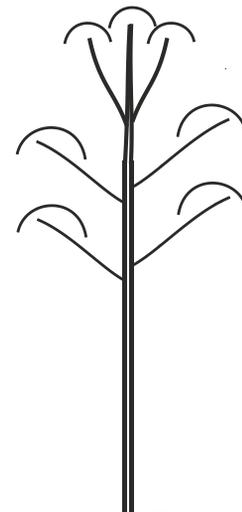
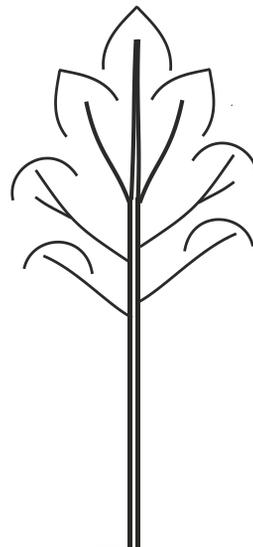
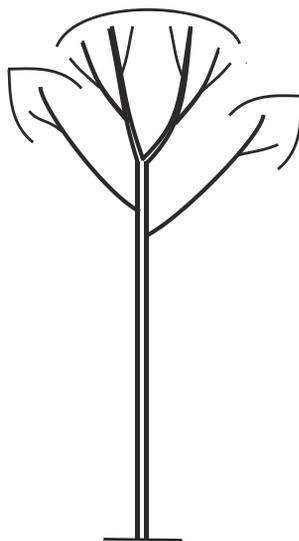
*arrondie et régulière*

*plate et irrégulière*

Fructification : moyenne

*très abondante*

Houppier hors concurrence

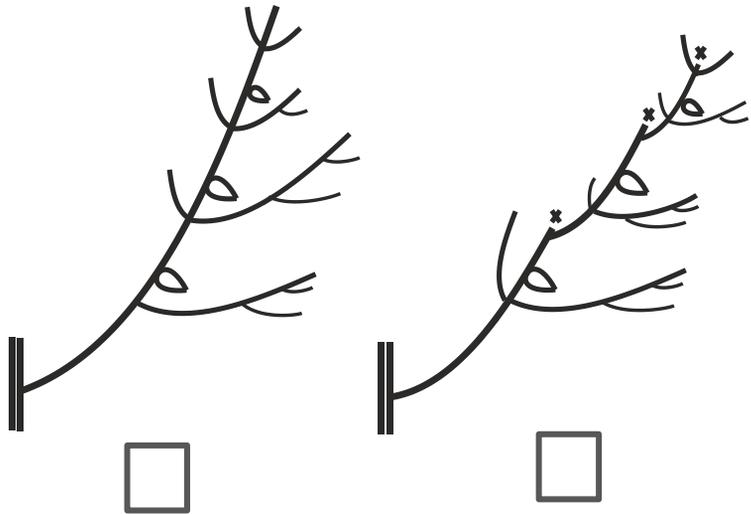


Contour des cimettes

Localisation de la floraison mâle: bas du houppier (branches basses)/ haut du houppier (branches hautes)

**Système ramifié**

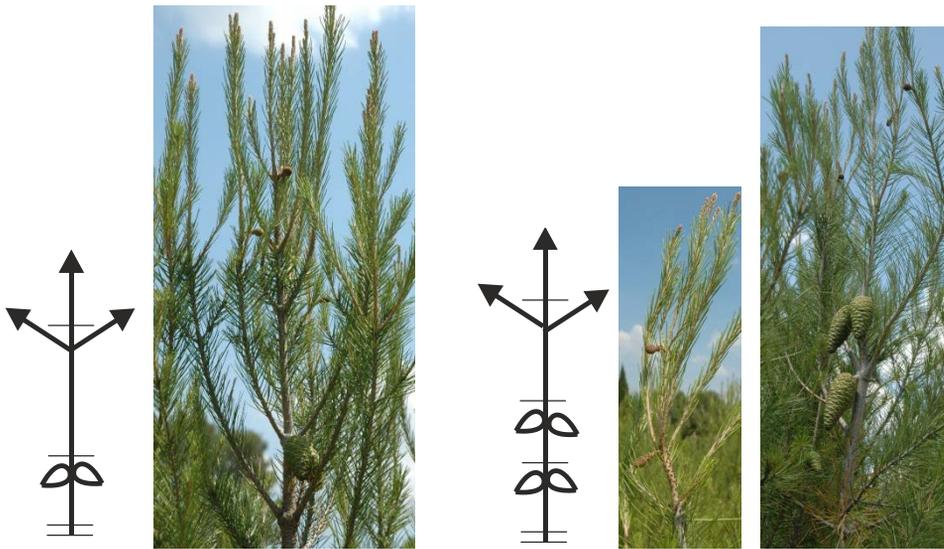
**Houppier hors concurrence**



*Mortalité des axes*

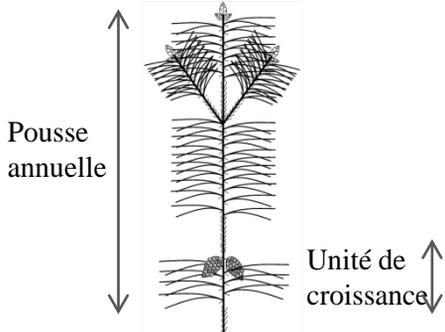
**Cime**

**Pousse annuelle**

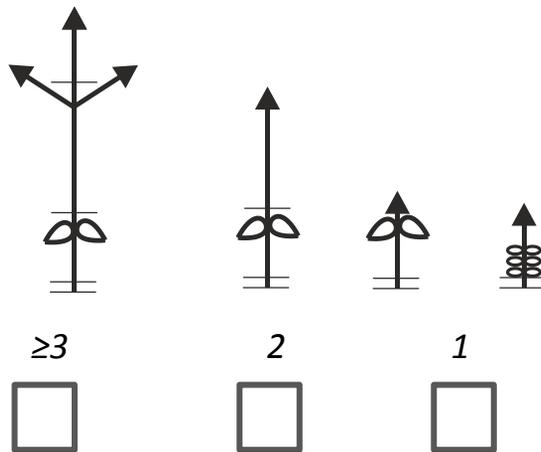


*Fructification par an :* 1

2

*Polycyclisme: nb. d'UC :*



# Diagnostic architectural *Pinus sylvestris*

## Arbre Jeune

Pousse annuelle

Cime

*Polycyclisme*

*Bourgeon terminal*



*Polycyclisme*

1UC

2 UCs



*Polycyclisme*

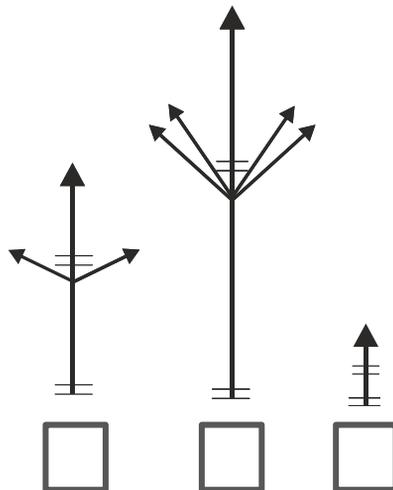
*Bourgeon latéral*



Année n

Année n+1

Année n+2



*Structure et taille*



Diagnostic architectural *Pinus sylvestris*  
Arbre adulte

Arbre entier

Cime



Cime

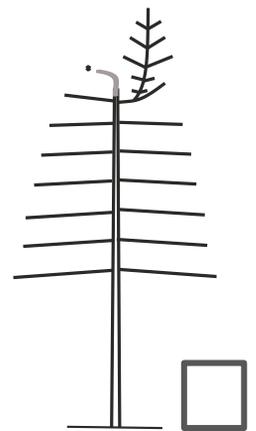
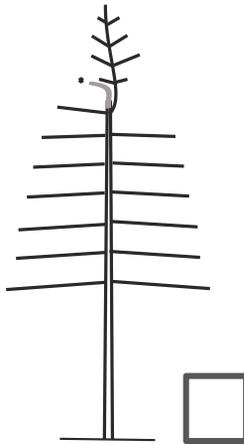
*pyramidale*

*plate*

Fructification : *moyenne*

*très abondante*

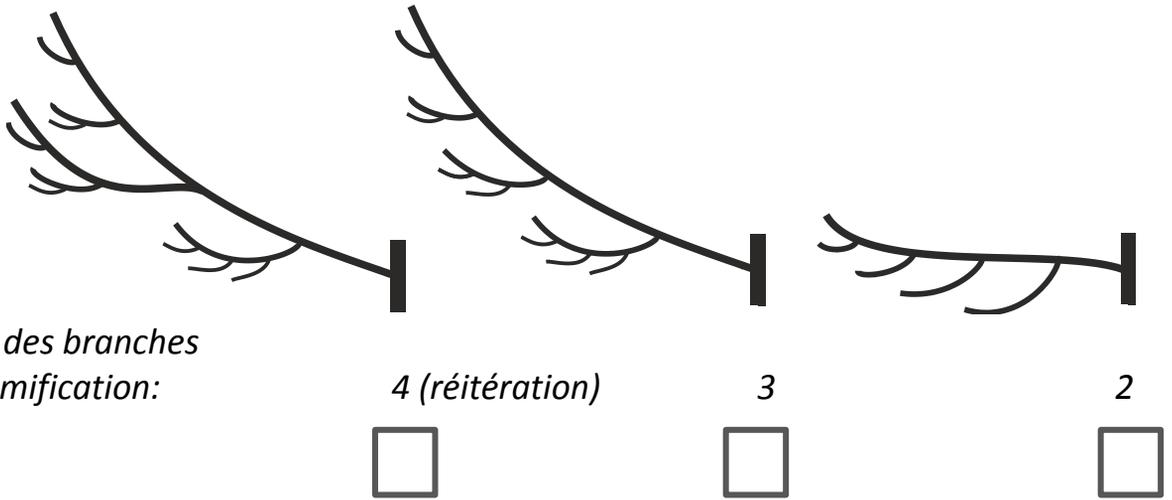
Houppier hors concurrence



Réitération à partir d'une branche

à partir d'un rameau sur la branche

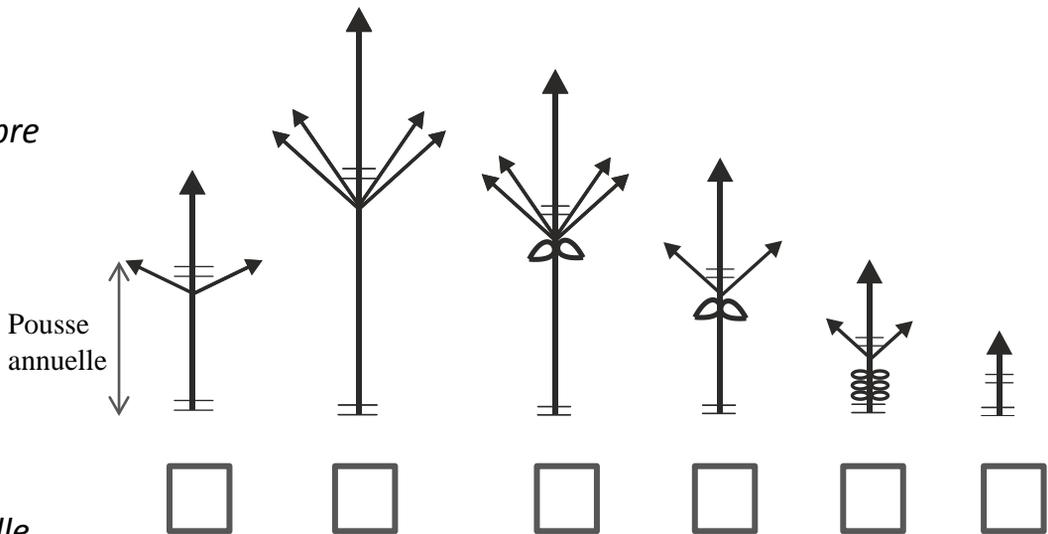
Houppier hors concurrence



Pousse annuelle

Cime

Vitalité de l'arbre



Structure et taille

# Diagnostic architectural *Cedrus atlantica*

## Arbre Jeune

Arbre entier

Cime



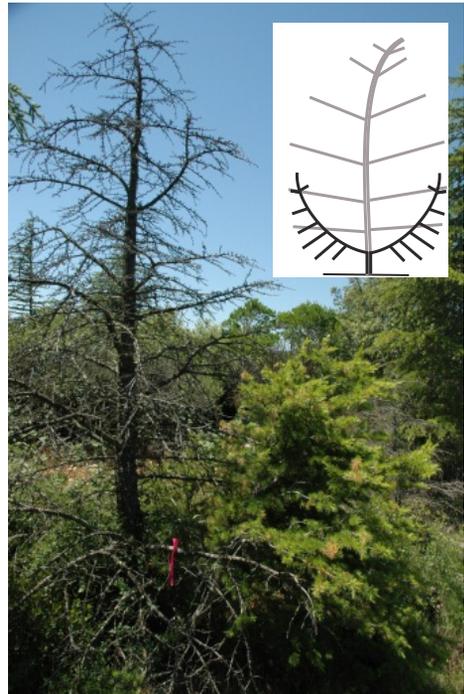
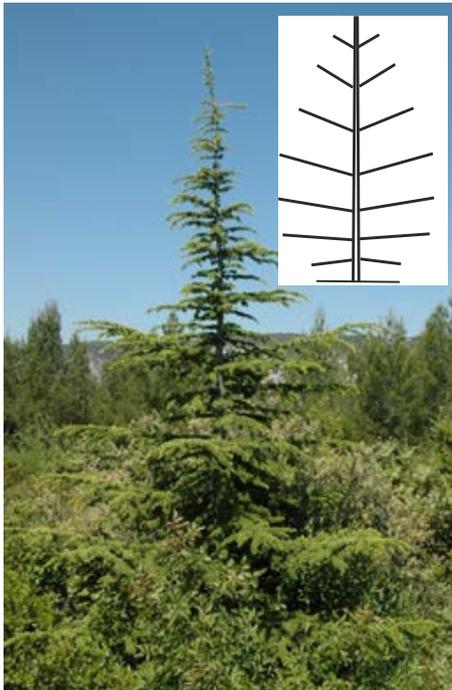
Contour

*pyramidal*

*tabulaire*



Tronc et branches basses

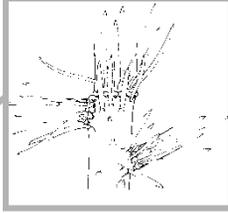
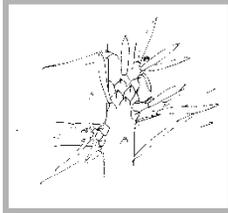


Réitération immédiate



Pousse annuelle

Cime



Polycyclisme

1UC

2 UCs



Structure et taille

## **5. Lexique des termes utilisés dans les clés ARCHI**

**A1, A2, A3, A4 :** l'axe principal d'une U.A. est noté A1, il porte des axes secondaires A2, ceux-ci produisent des rameaux longs A3, lesquels donnent des rameaux courts A4.

**Agéotrope :** se dit d'un axe qui n'a pas de direction de croissance privilégiée.

**Chicot:** branche cassée de diamètre supérieur à 3 cm. Ne pas confondre « chicot » (plaie non recouverte par du bois) et « coude » (plaie recouverte).

**Flèche :** partie sommitale du tronc comprenant les six derniers étages de branches.

**Gourmands vigoureux :** gourmands plagiotropes ou orthotropes présentant une forte dominance apicale (existence d'un axe principal dominant), une forte croissance (net espacement entre les étages de ramifications), et une sexualité absente ou limitée à quelques cônes femelles.

**Gourmands nombreux :** gourmands présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.

**Houppier hors concurrence :** partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.

**2e houppier :** structure constituée de gourmands (parfois mélangés à des branches) hiérarchisés entre eux, certains étant dominants, d'autres dominés.

**Module :** le châtaignier à une croissance sympodiale (mort annuelle du bourgeon terminale); ses allongements annuels, issus des bourgeons sub-terminaux, sont appelés : «modules».

**Module complet :** un module de châtaignier qualifié de « complet » comprend 4 à 5 zones morphologiques (de la base vers l'apex : bourgeons latents, chatons mâles, bourgeons latents, chatons bisexués et zone de ramification).

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

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

**Unité architecturale (U.A.):** architecture élémentaire de l'arbre. La première est à l'origine du tronc, les suivantes dérivent les unes des autres par réitération et forment le houppier. Le long d'une branche maîtresse, chaque U.A. réitérée est délimitée par deux fourches successives.

**U.A. à ramification normale:** U.A. au contour quasi-pyramidal présentant un gradient de ramification depuis l'A1 jusqu'aux rameaux A3 et A4.

**U.A. à ramification appauvrie:** U.A. de forme colonnaire présentant un passage brutal de l'A1 aux rameaux courts.

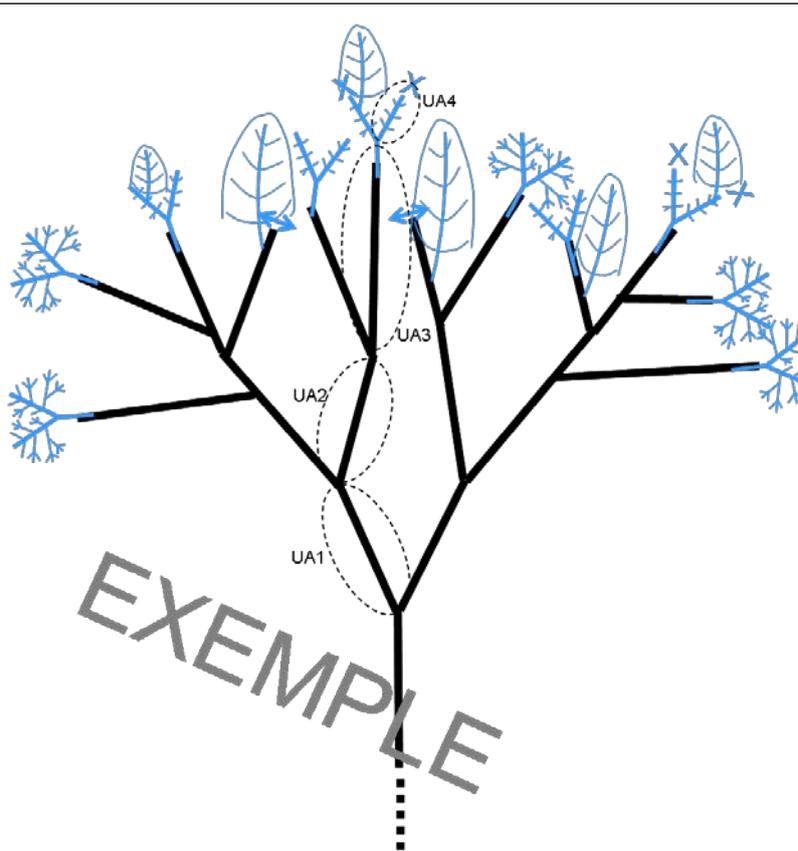
## 6 : fiches pédagogiques de schématisation des chênes et du douglas

Chêne schématisé n°....

**Légende**

-  Axe cassé
-  Axe mort
-  Ramification normale
-  Ramification appauvrie
-  Gourmands orthotropes
-  Gourmands plagiotropes
-  Gourmands agéotropes

Type ARCHI:  
Nom de l'observateur:



Douglas n°....

Nom de l'observateur:

**Légende**

-  Axe cassé
-  Axe mort
-  Ramification avec draperie
-  Ramification sans draperie
-  Gourmand vigoureux (orthotropes ou plagiotropes)
-  Gourmands chétifs (agéotropes)

Type ARCHI:  
% de déficit foliaire:

Coloration anormale (oui/non):  
Couleur (code DSF):

Fente écorce (oui/non):  
Nécrose cambiale (oui/non):

Formation ARCHI Douglas – Mars 2013 – Ch. Drénou - IDF



## Formation à la méthode de diagnostic ARCHI des chênes

Fiche n° 1	- Conditions d'observation
Fiche n° 2	- Distinction branche-gourmand
Fiche n° 3	- 3 types de gourmands
Fiche n° 4	- La ramification
Fiche n° 5	- Le type sain
Fiche n° 6	- Le type R : Résilient
Fiche n° 7	- Le type D : Descente de cime
Fiche n° 8	- Le type I : Dépérissement irréversible
Fiche n° 9	- Le type S : État de stress
Fiche n° 10	- Les dynamiques de réaction des chênes après un dépérissement
Fiche n° 11	- La méthode Archi



**Choix des arbres à observer**

Ils doivent impérativement se situer dans la strate dominante ou codominante. Cette précaution permet de ne pas prendre en considération les symptômes de dépérissement et de mortalité caractéristiques des sujets dominés manquant de lumière directe.

**Délimitation des houppiers hors concurrence**

Le houppier hors concurrence correspond à la partie supérieure du houppier qui n'est pas soumise à une concurrence trop forte.

En forêt, on délimite la base du houppier hors concurrence par la ligne joignant les contacts latéraux avec les voisins.

En milieu ouvert, l'arbre étant en croissance libre, le houppier hors concurrence est composé de l'ensemble de la couronne de l'arbre.

**Conditions d'observation**

L'observateur se placera à peu près à une distance équivalente à la hauteur totale de l'arbre.

La meilleure période d'observation est l'hiver.

Avant de commencer l'analyse, le notateur s'assurera d'observer le houppier de l'arbre avec l'orientation la plus représentative possible de l'ensemble du houppier. Si une seule observation ne semble pas suffisante, ne pas hésiter à en faire plusieurs avec des angles de vue différents.

Il est également conseillé de réaliser les observations en pleine journée pour bénéficier d'une luminosité propice aux observations. En fin de journée, la différenciation entre gourmands et branches devient hasardeuse.

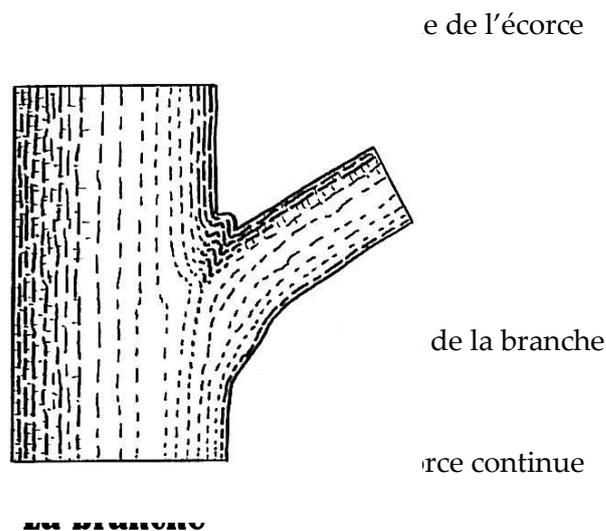
Matériel nécessaire : jumelles uniquement.

**Observer la zone d'insertion**

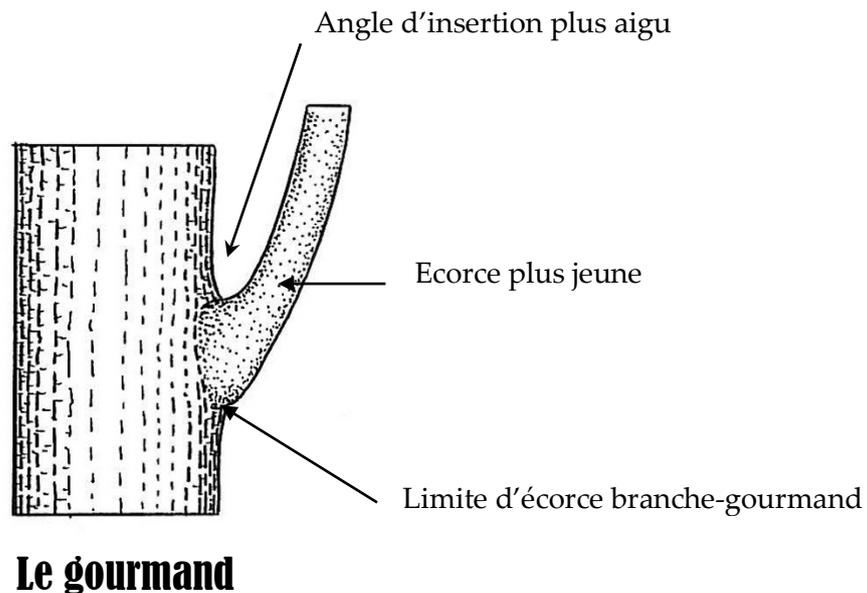
Celle d'un gourmand est marquée par la présence d'un empattement caractéristique et l'angle d'insertion est différent de celui d'une branche. Lorsque le gourmand vieillit, il se forme un décrochement notable au niveau de cette zone.

**Observer l'écorce**

Celle d'un gourmand est généralement plus claire (grise ou verte) que celle d'une branche car plus jeune. L'écorce de la branche s'inscrit au contraire dans la continuité de l'écorce de la structure qui la porte.



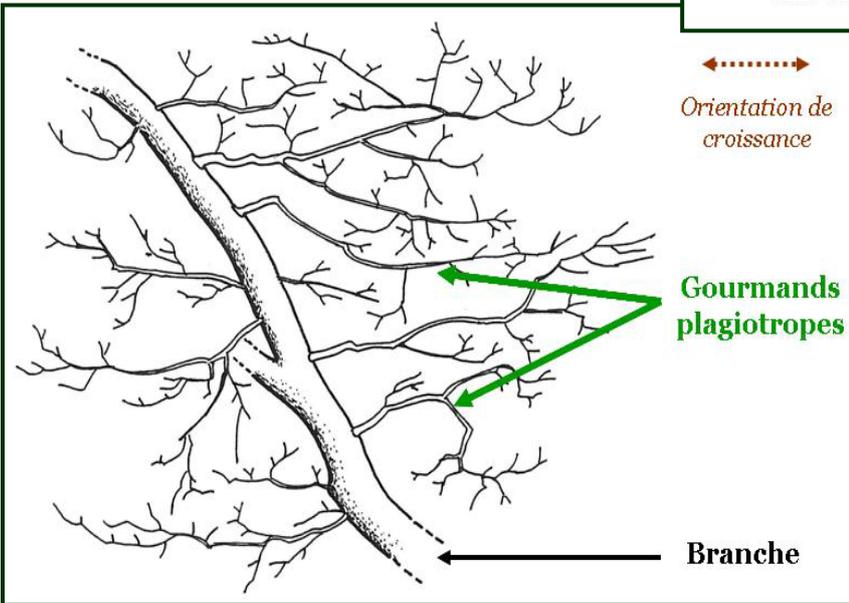
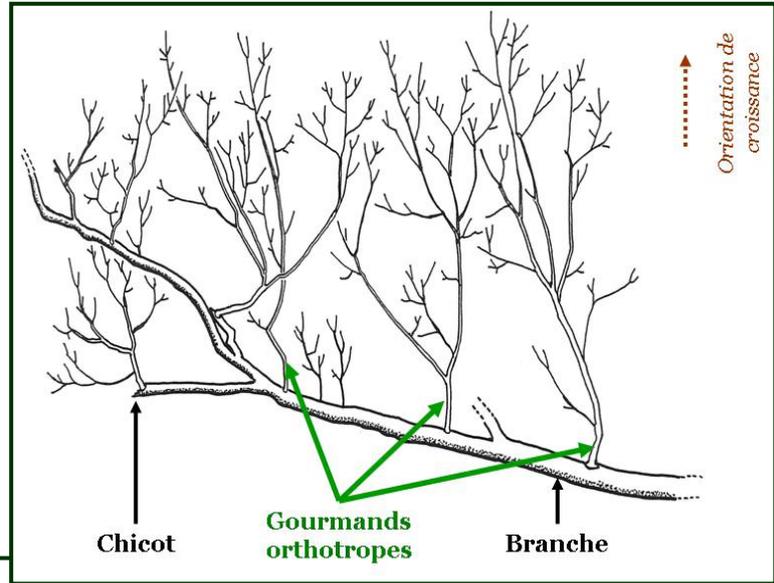
**LA BRANCHE**



Comment différencier les 3 types de gourmands ?

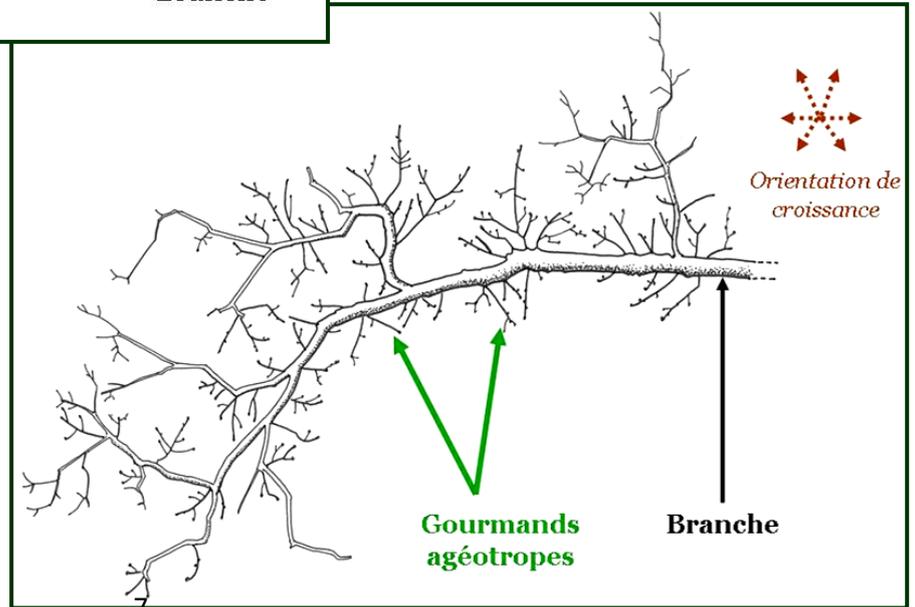
**Les gourmands orthotropes**

Croissance verticale  
Symétrie radiale  
Phyllotaxie spiralée



**Les gourmands plagiotropes**

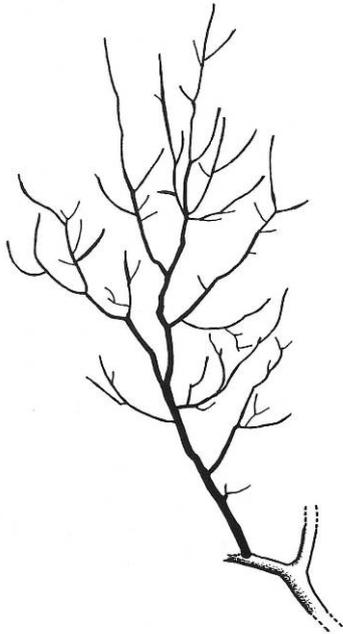
Croissance horizontale  
Nette dorsiventralité  
Phyllotaxie distique



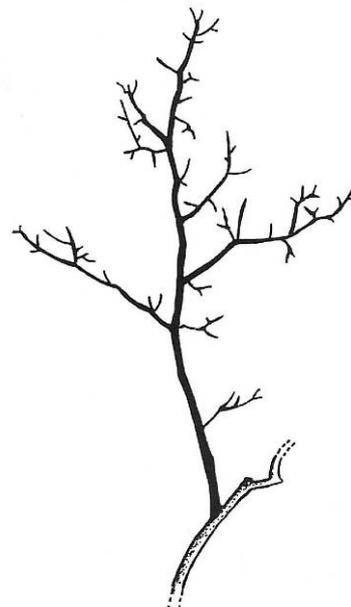
**Les gourmands agéotropes**

Aucune orientation privilégiée  
Peu ramifiés  
Grêles et petits

Ramification	Dominance apicale	Ramification secondaire	Pousses annuelles	Polycyclisme
Normale	Forte	Dense	Longues	Oui
Appauvrie	Faible	Appauvrie	Courtes	Non



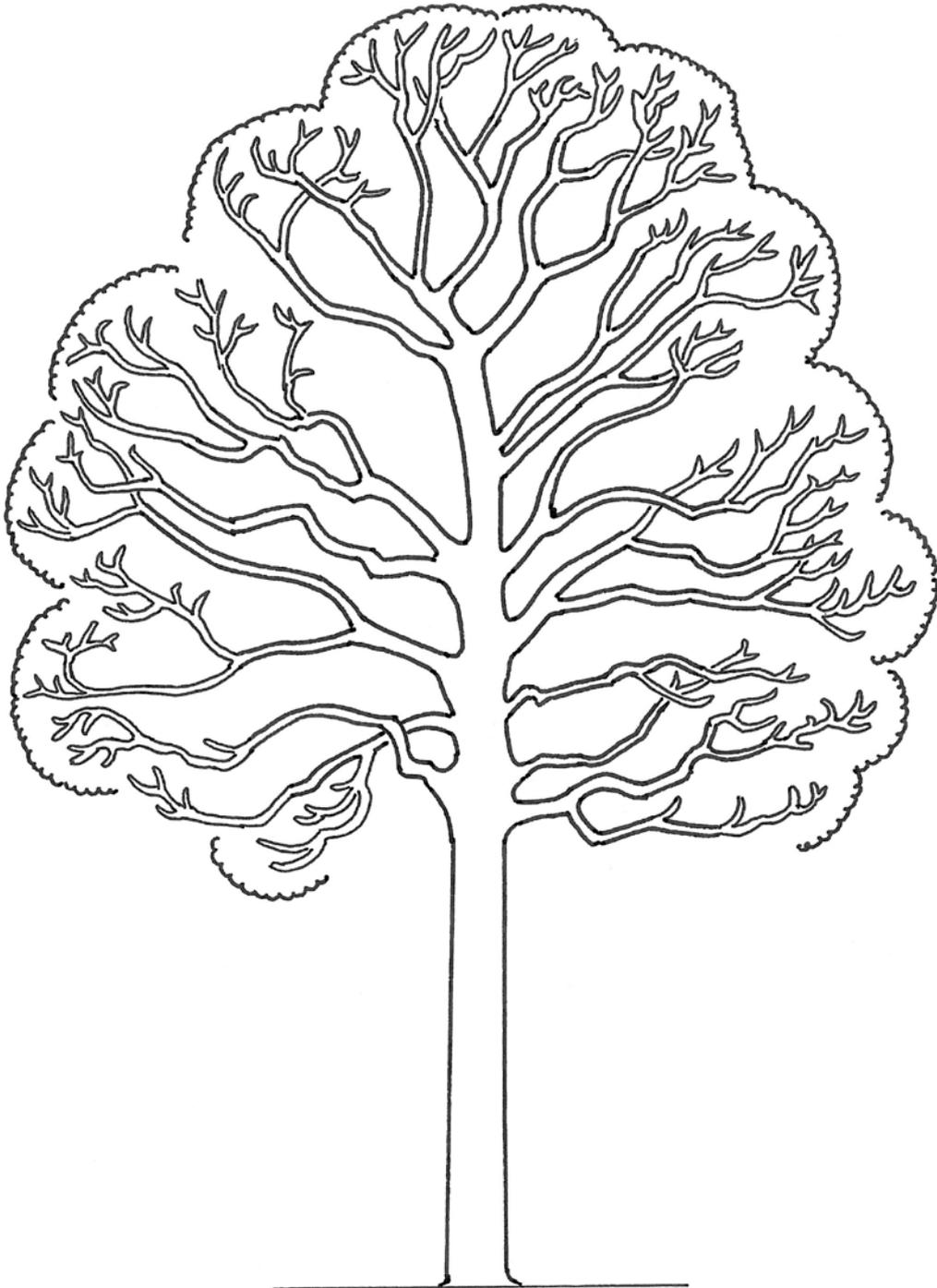
Ramification normale chez un gourmand orthotrope



Ramification appauvrie chez un gourmand orthotrope

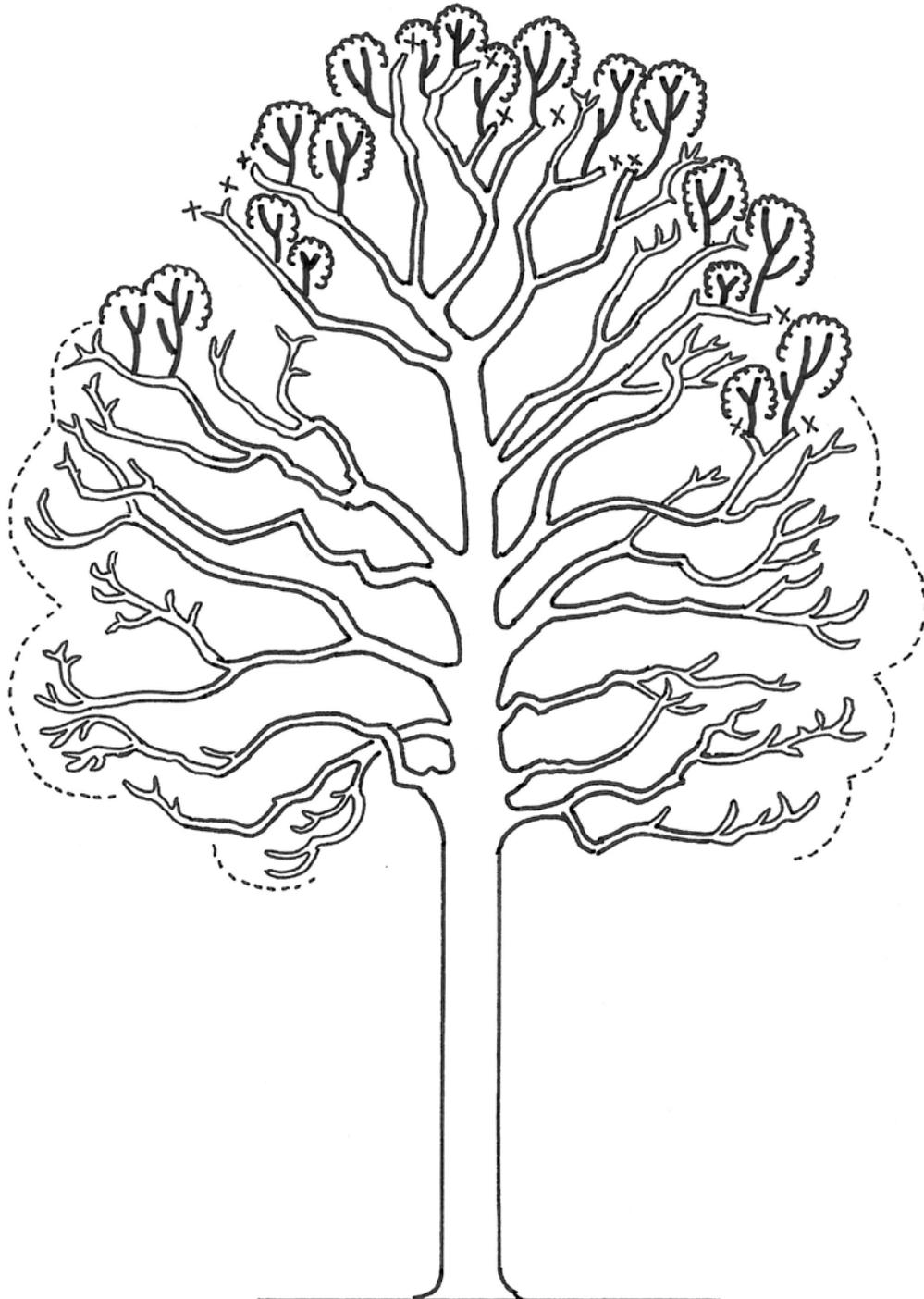
Le chêne sain n'a subi aucun stress récent suffisamment important pour entraîner une modification de son architecture. Il sert de référence pour l'analyse des arbres déperissants.

Dans certaines régions, les sujets sains sont rares en raison de conditions climatiques et sylvicoles défavorables au chêne pédonculé.

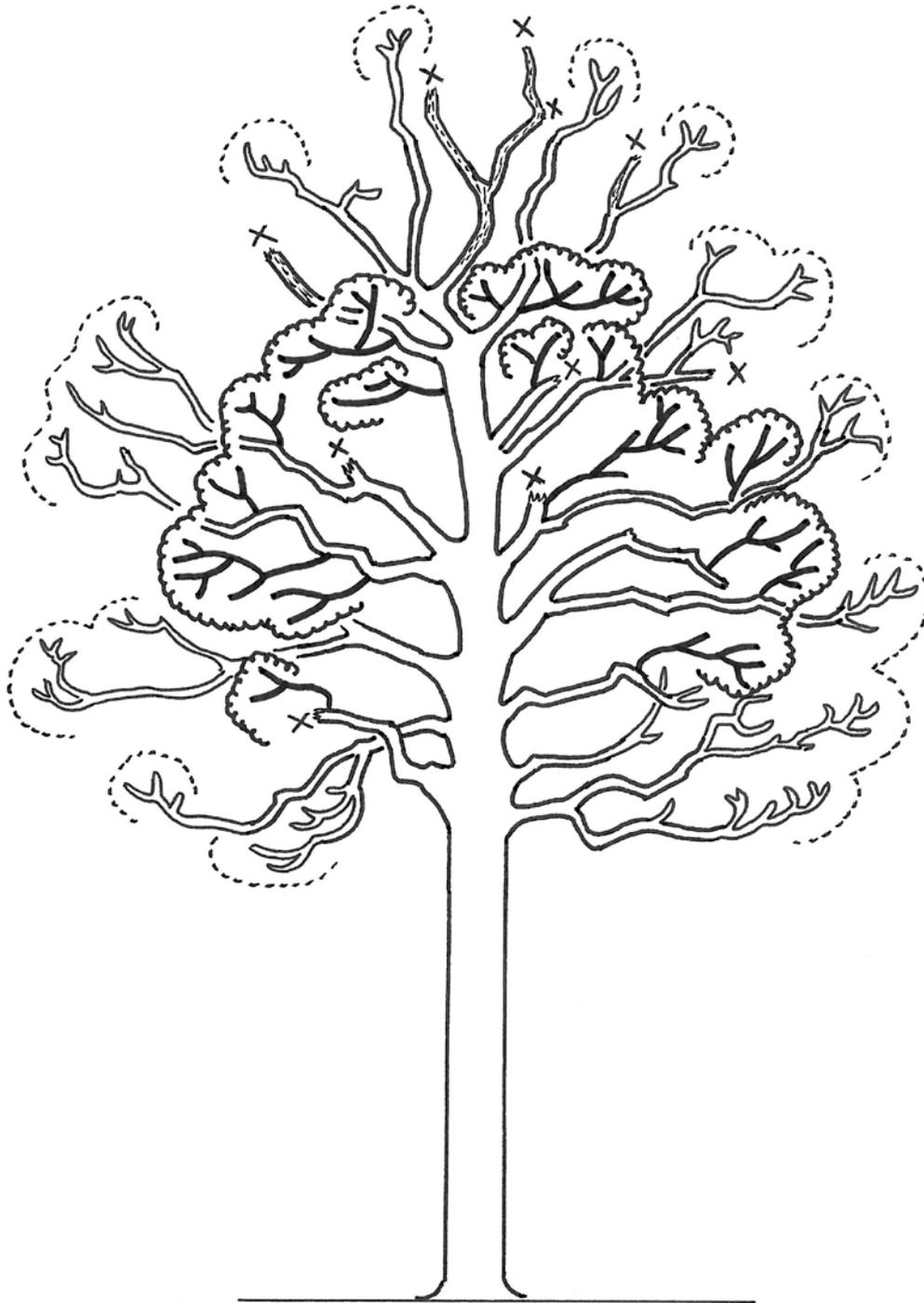


*Dessins : Ch. Drénou*

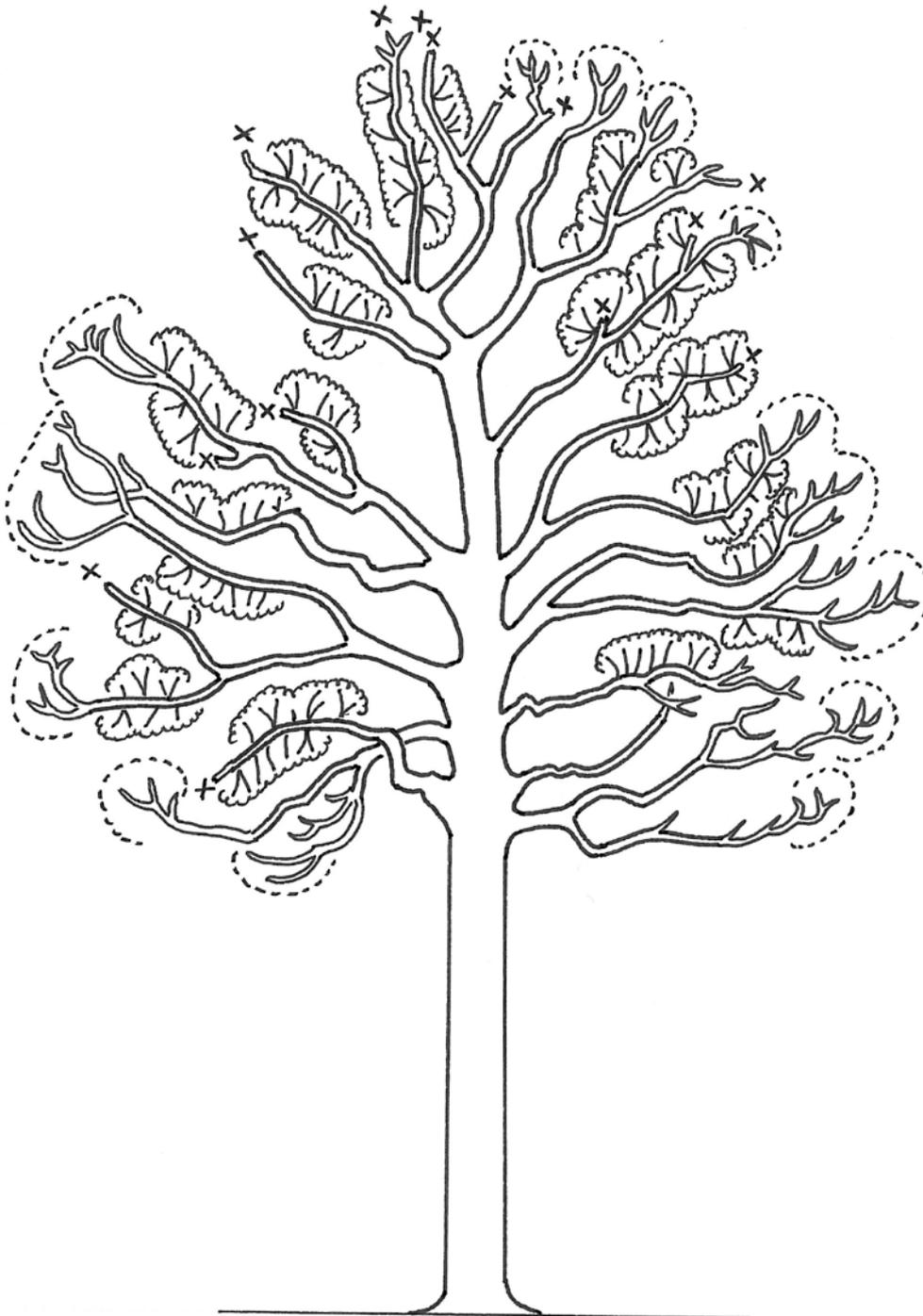
Ce chêne réagit **positivement** après un dépérissement. Son houppier présente des branches mortes visibles à l'œil nu, mais elles sont progressivement remplacées par des gourmands orthotropes. Au niveau de la largeur des cernes formés, après une période de stagnation, la croissance radiale se rétablit. Un chêne résilient est potentiellement un arbre d'avenir, à condition que la grume soit de qualité et que la station soit apte à produire du bois d'œuvre.



En peuplement peu dense et en milieu ouvert, un dépérissement en tête peut être compensé par l'apparition d'un deuxième houppier à un niveau inférieur. C'est le processus de descente de cime. Les gourmands, plagiotropes et orthotropes s'organisent alors de façon hiérarchisée autour de la base des branches maîtresses et du tronc. La chute des branches mortes en partie supérieure ramènera ultérieurement l'arbre vers un état sain mais avec une hauteur moindre.



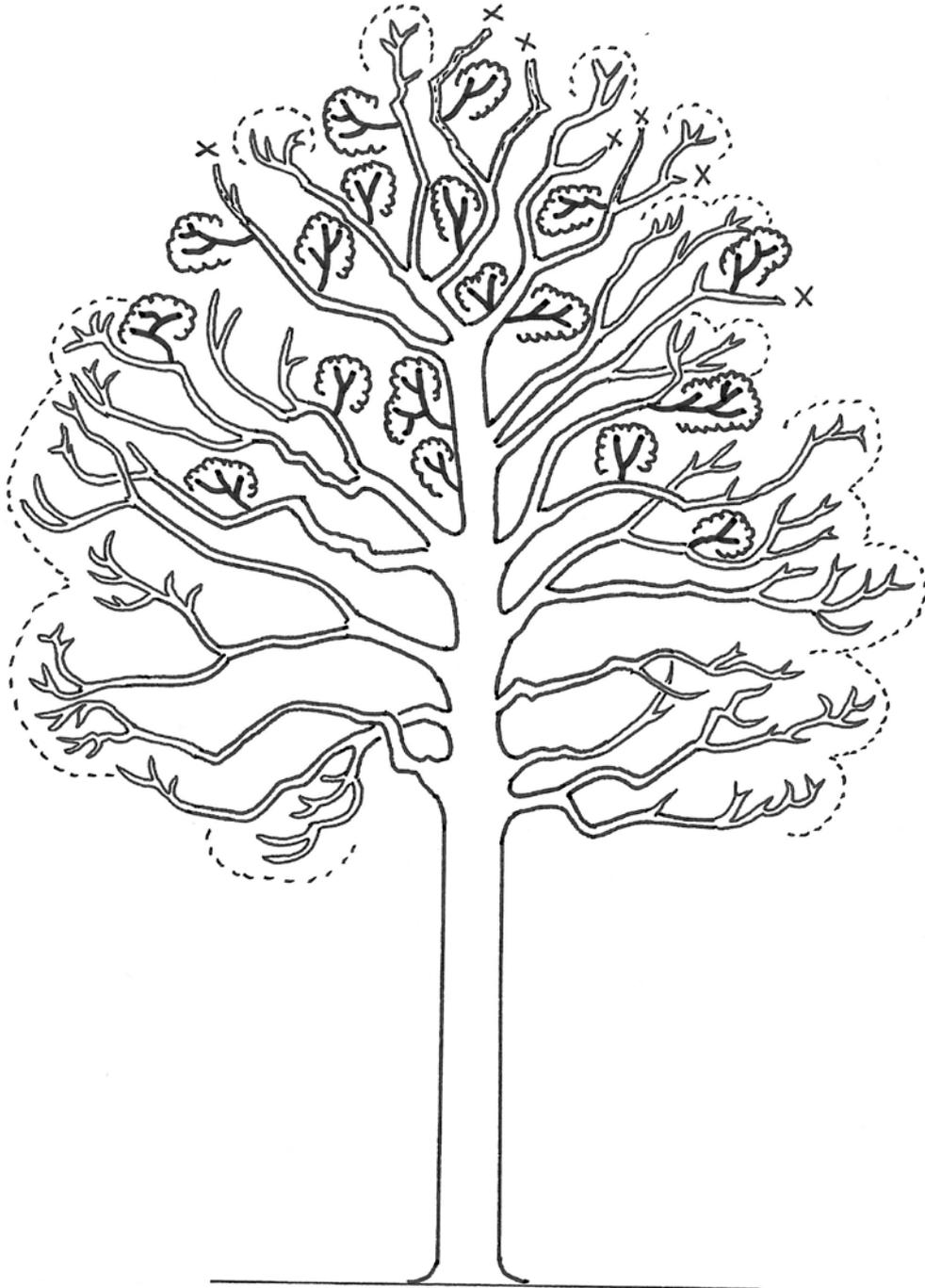
Ce chêne en état de dépérissement émet des gourmands, mais ceux-ci ne lui permettent pas de surmonter le stress subi. Diminution de la masse foliaire, réduction des réserves carbonées, rétrécissement de la largeur des cernes, la situation est irréversible, même si l'arbre peut parfois se maintenir plusieurs années dans cet état de vie ralentie avant de finir par mourir. Un chêne de type I ne peut être sélectionné comme arbre d'avenir.



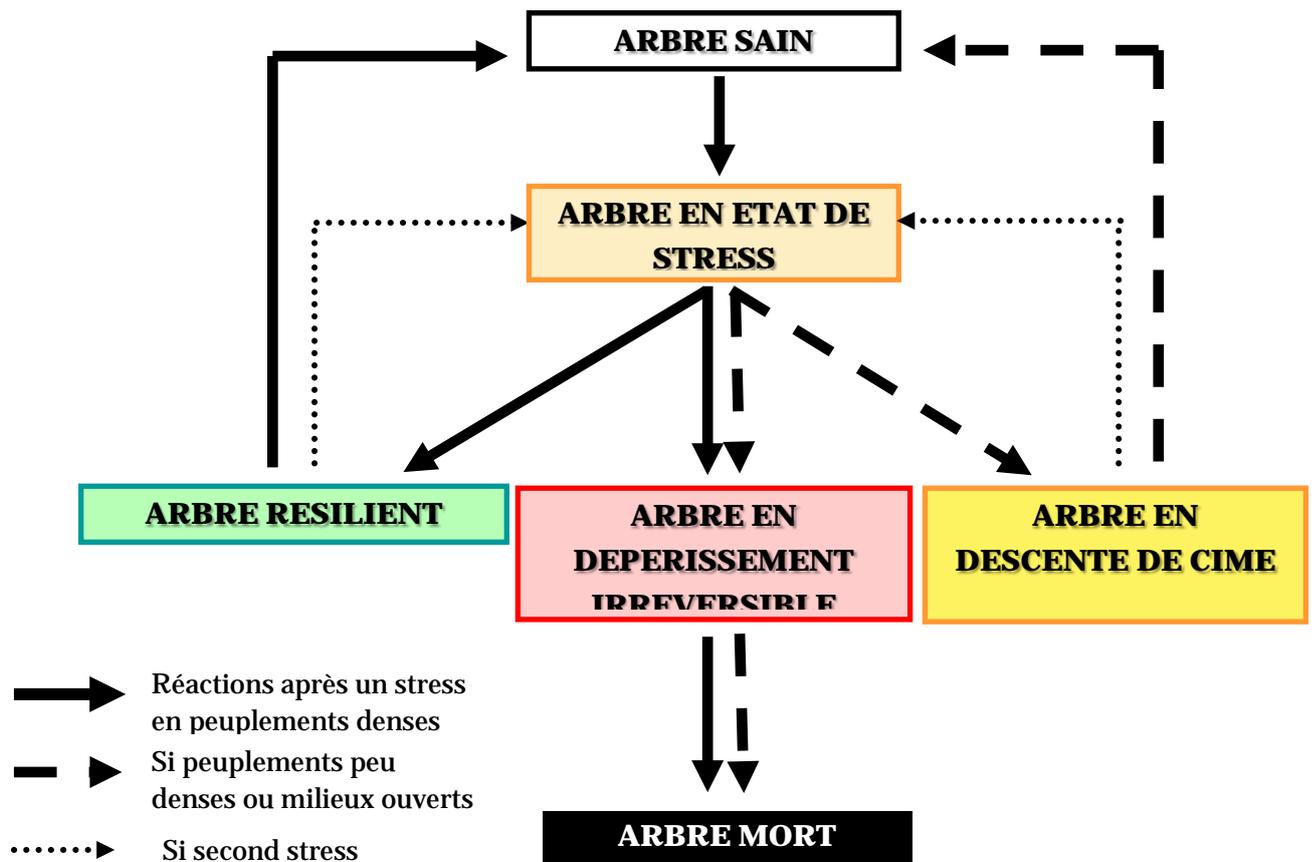
Ce chêne réagit à un dépérissement mais les symptômes sont trop récents pour pouvoir se prononcer sur son avenir :

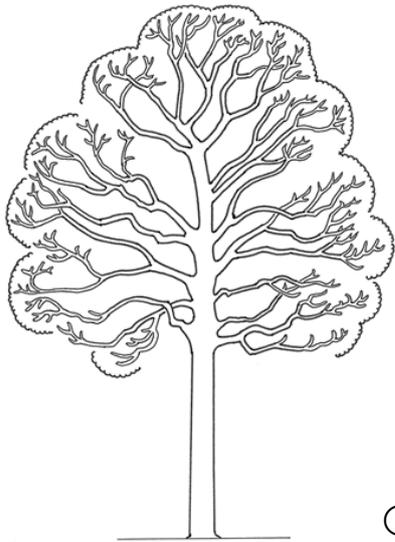
la réaction par automutilation des branches (ramification appauvrie et mortalité) débute seulement, la mise en place des gourmands est trop récente pour se prononcer sur leur développement, le stress fait suite à un premier stress que le chêne a surmonté et se répercute en conséquence sur des gourmands déjà en place.

Il est nécessaire de suivre au cours du temps l'évolution des chênes de type S avant d'établir un pronostic.

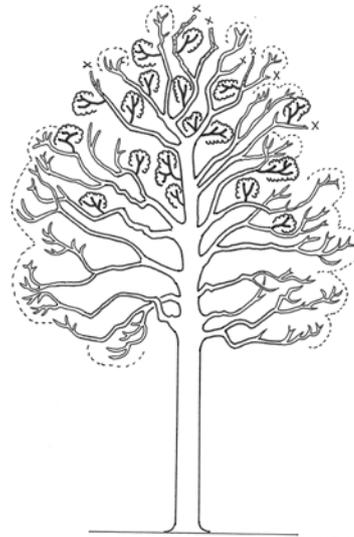


Dessins : Ch. Drénou

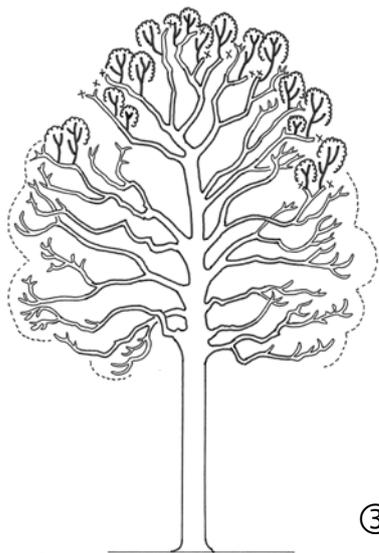




①



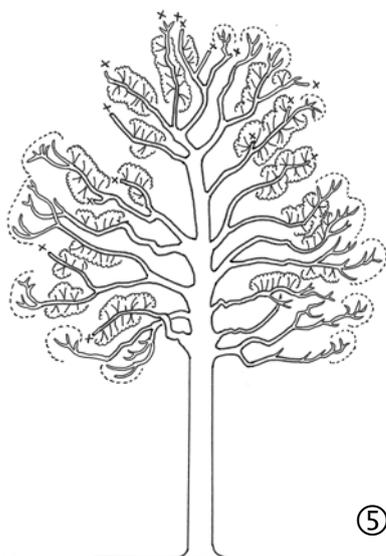
②



③



④



⑤

- ① : Arbre sain
- ② : Arbre en état de stress
- ③ : Arbre résilient
- ④ : Arbre en descente de cime
- ⑤ : Arbre en dépérissement irréversible

## **8 : support pédagogique pour l'utilisation des clés ARCHI**

# Les CLÉS ARCHI

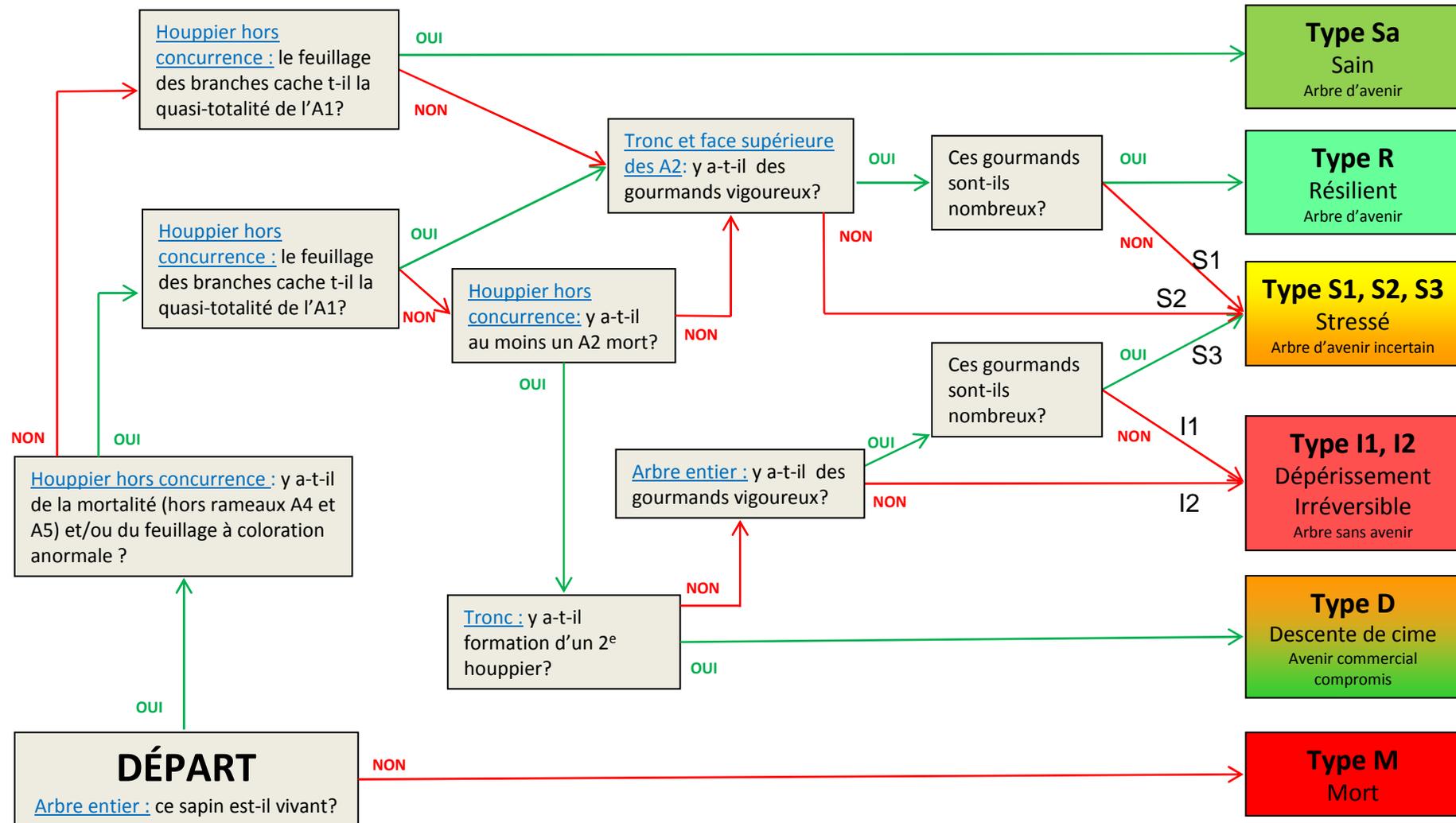
Support pédagogique

Christophe Drénou – Juin 2013



La CLÉ ARCHI sapin

## Clé de détermination des types ARCHI chez le sapin pectiné (*Abies alba*)



**Houppier hors concurrence** : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence (Fig. 3)

**A1, A2, A3** : le tronc est l'axe d'ordre 1 (A1), il porte des étages de branches appelées A2, lesquelles portent des rameaux A3. L'ordre de ramification du sapin est de 5.

**Gourmands vigoureux** : gourmands plagiotropes ou orthotropes présentant une forte dominance apicale (existence d'un axe principal dominant), une forte croissance (net espacement entre les étages de ramifications), et une sexualité absente ou limitée à quelques cônes femelles (Fig. 4).

**Gourmands nombreux** : gourmands présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.

**2e houppier** : structure constituée de gourmands vigoureux portés par le tronc et hiérarchisés entre eux, certains étant dominants, d'autres dominés (Fig. 9).

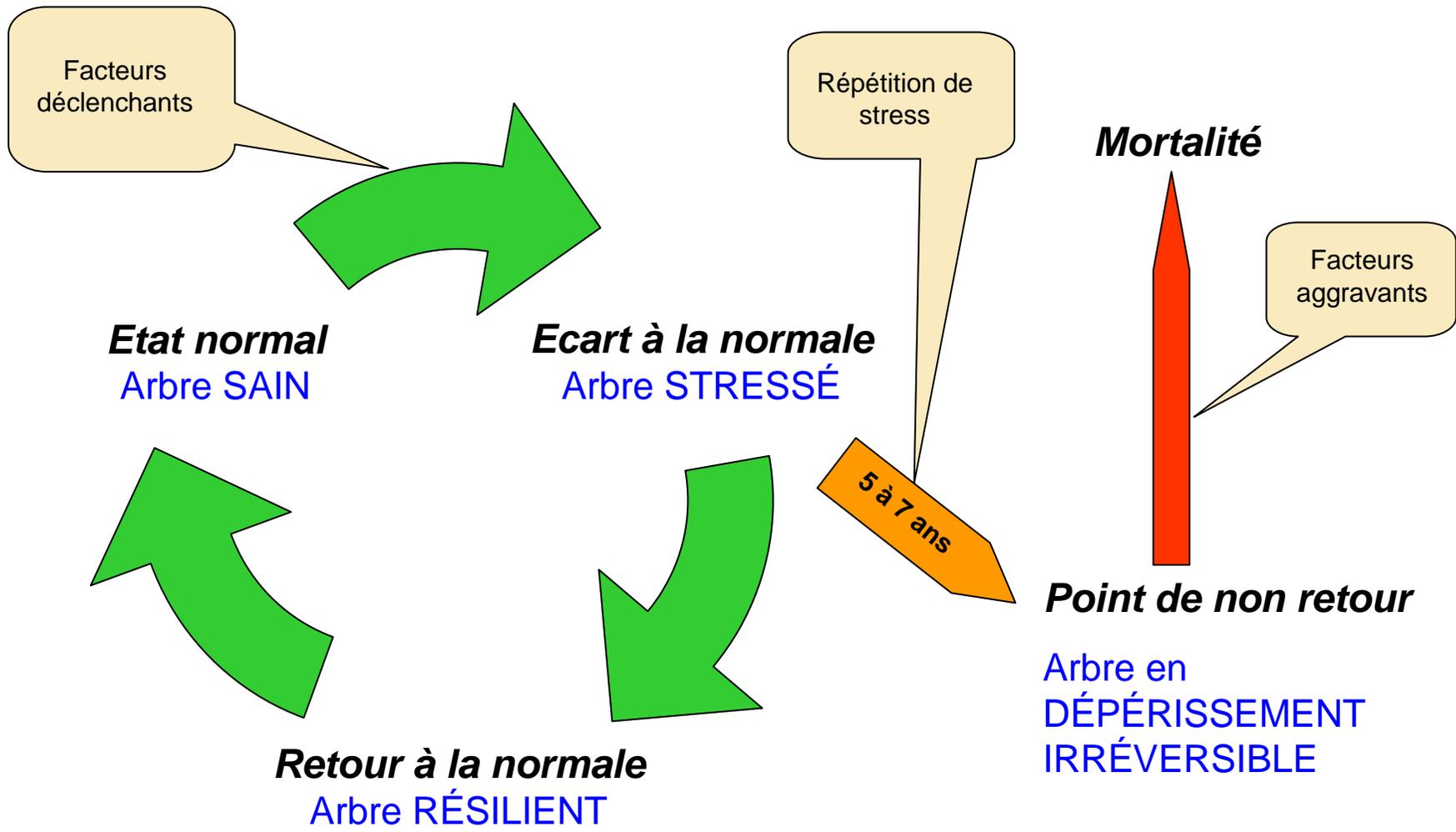


Figure 1: les dynamiques de réactions d'un arbre aux aléas

## Les 6 types ARCHI

Arbre sain : arbre dont l'architecture est conforme à son stade de développement

Arbre stressé : arbre dont l'architecture s'écarte de la norme et dont l'avenir est incertain

Arbre résilient : arbre présentant une dynamique de retour à la normale

Arbre en descente de cime : arbre présentant une dynamique de construction d'un nouvel houppier sous la cime

Arbre en situation de dépérissement irréversible : arbre bloqué dans une situation de non retour à la normale

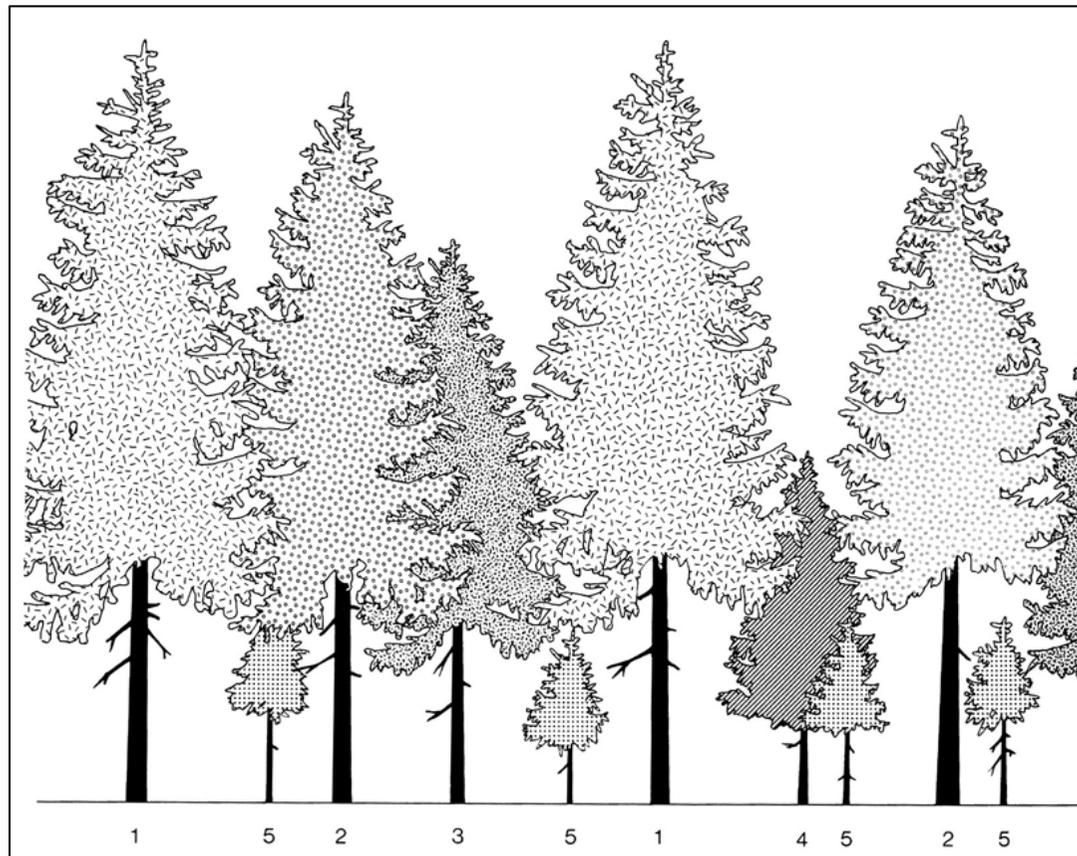
Arbre mort : arbre dont le cambium est mort est 1,30m

Symptômes de dégradation	Processus de restauration	Etat de l'arbre adulte & appellation
AUCUN	ABSENTS	Etat normal <b>Arbre SAIN</b>
LÉGERS Présence de mortalité dans le houppier notable, <u>mais</u> feuillage dense ; ou feuillage peu dense, <u>mais</u> mortalité limitée aux A3 et A4	ABSENTS ou FAIBLES Absence de gourmands vigoureux ; ou gourmands vigoureux peu nombreux	Ecart à la normale <b>Arbre STRESSE</b>
	PREPONDERANTS sur les A2 Présence de gourmands vigoureux et nombreux	Retour à la normale <b>Arbre RESILIENT</b>
IMPORTANTES Feuillage peu dense <u>et</u> présence d'A2 morts	ABSENTS ou FAIBLES Absence de gourmands vigoureux ; ou gourmands vigoureux peu nombreux	Point de non-retour à la normale <b>Arbre en DEPERISSEMENT IRREVERSIBLE</b>
	PRESENTS mais DIFFUS Présence de gourmands vigoureux et nombreux, mais non hiérarchisés et diffus dans l'arbre entier	Ecart à la normale <b>Arbre STRESSE</b>
	PREPONDERANTS sur le tronc Présence de gourmands vigoureux, nombreux et hiérarchisés (formation d'un deuxième houppier)	Retour à un état proche de la normale <b>Arbre en DESCENTE de CIME</b>

Tableau 2: principe de la méthode ARCHI

## Fig. 2. Statut des arbres

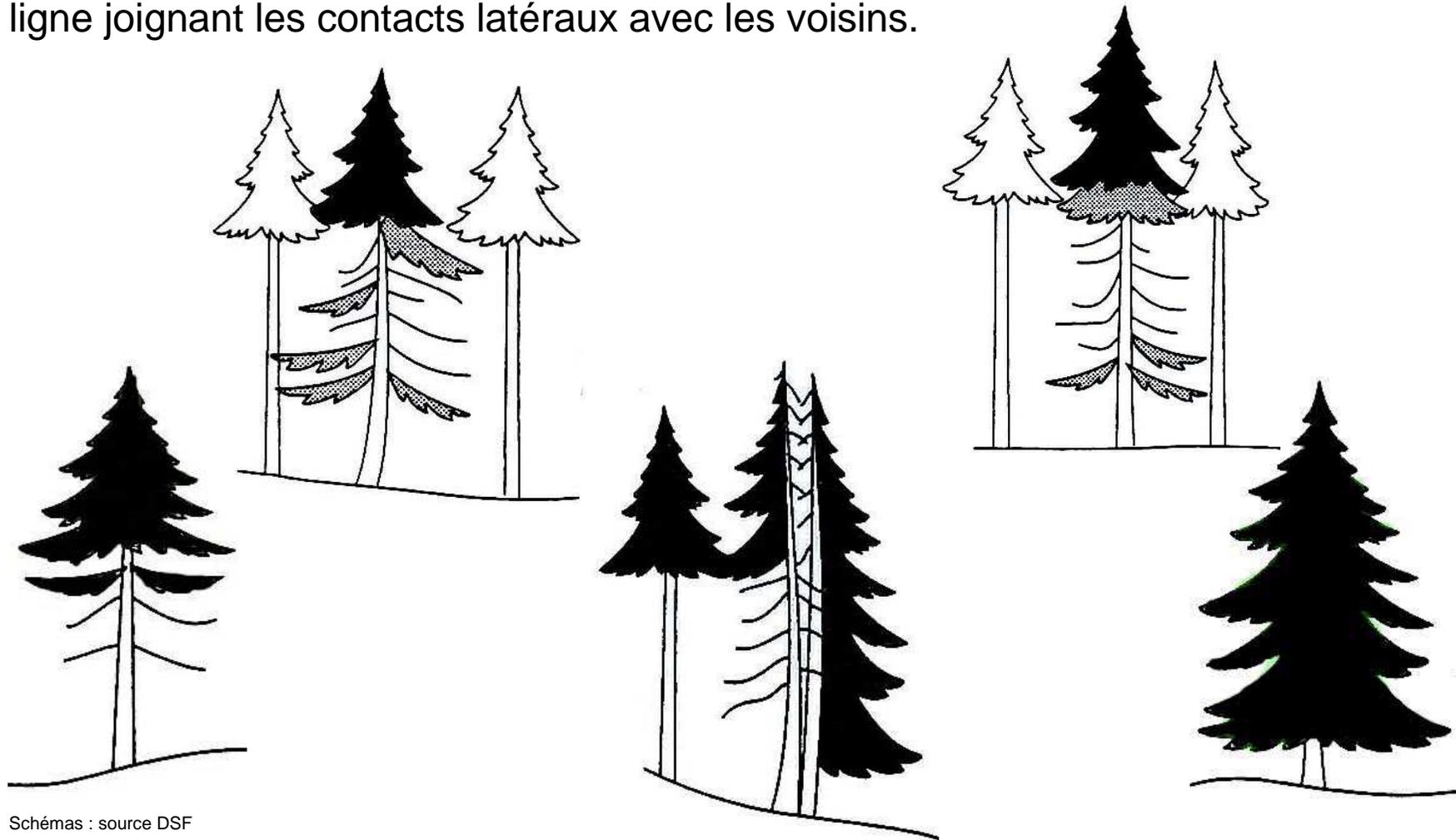
Afin de limiter les interférences entre problèmes phytosanitaires et symptômes liés à la concurrence ou au manque de lumière, ne sont pris en compte que des arbres **dominants ou co-dominants**.



1: dominant, 2: co-dominant, 3: dominé, 4: sous-étage, 5: strate arbustive

## Fig. 3. Houppier hors concurrence

Partie supérieure du houppier, « à la lumière », excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence. Situé au-dessus de la ligne joignant les contacts latéraux avec les voisins.



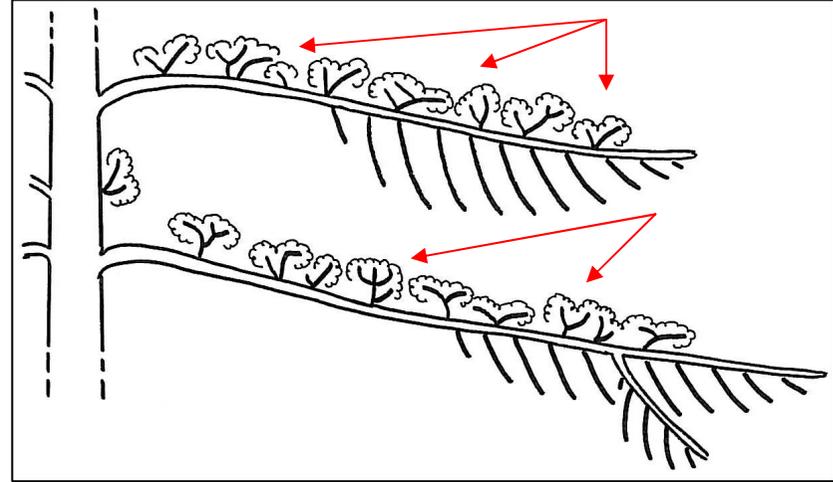
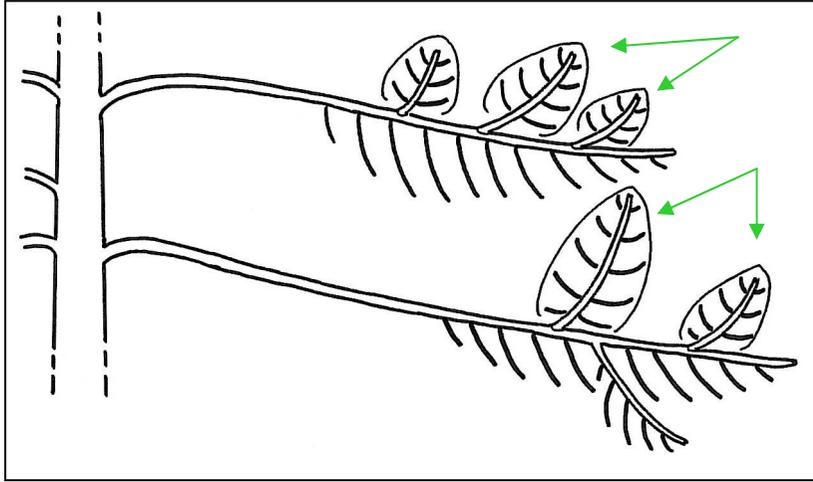


Figure 4 : représentation schématique de gourmands vigoureux de sapin (fléchés, à gauche) et de gourmands non vigoureux (à droite). Dessins originaux : Ch. Drénou

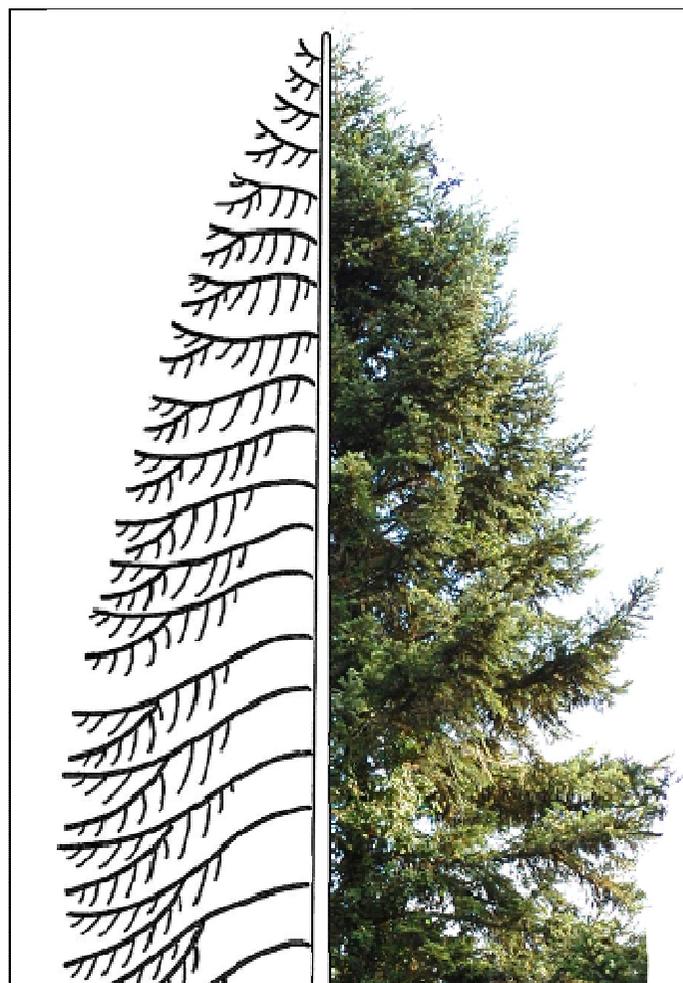


Figure 5 : sapin de type ARCHI Sa (sain)

Dessin et photo: Ch. Drénou

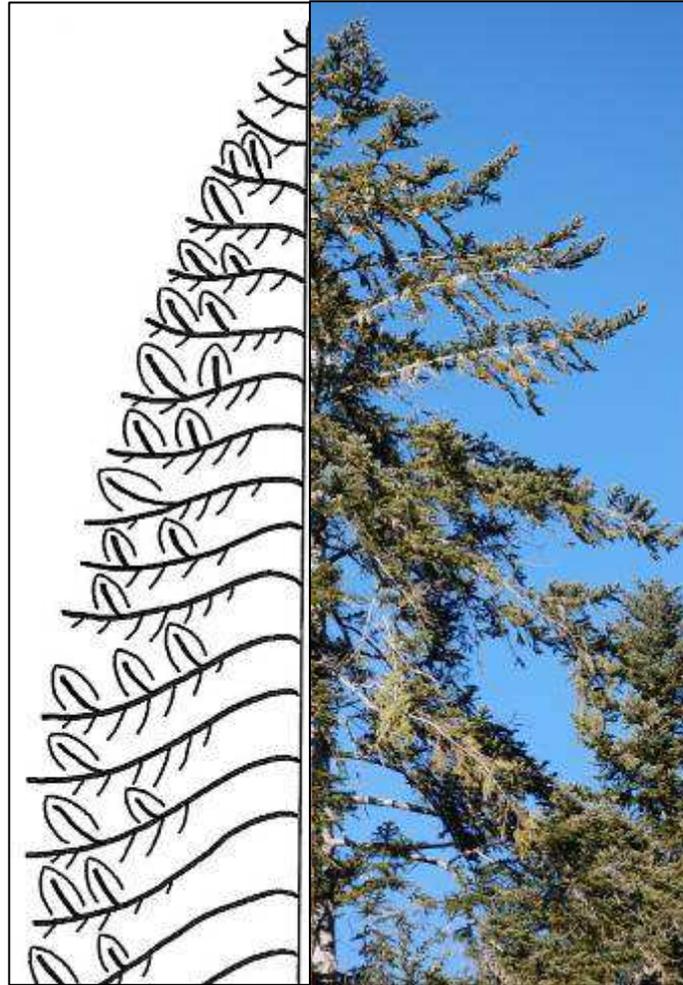


Figure 6 : sapin de type ARCHI R (Résilient)

Dessin et photo: Ch. Drénou

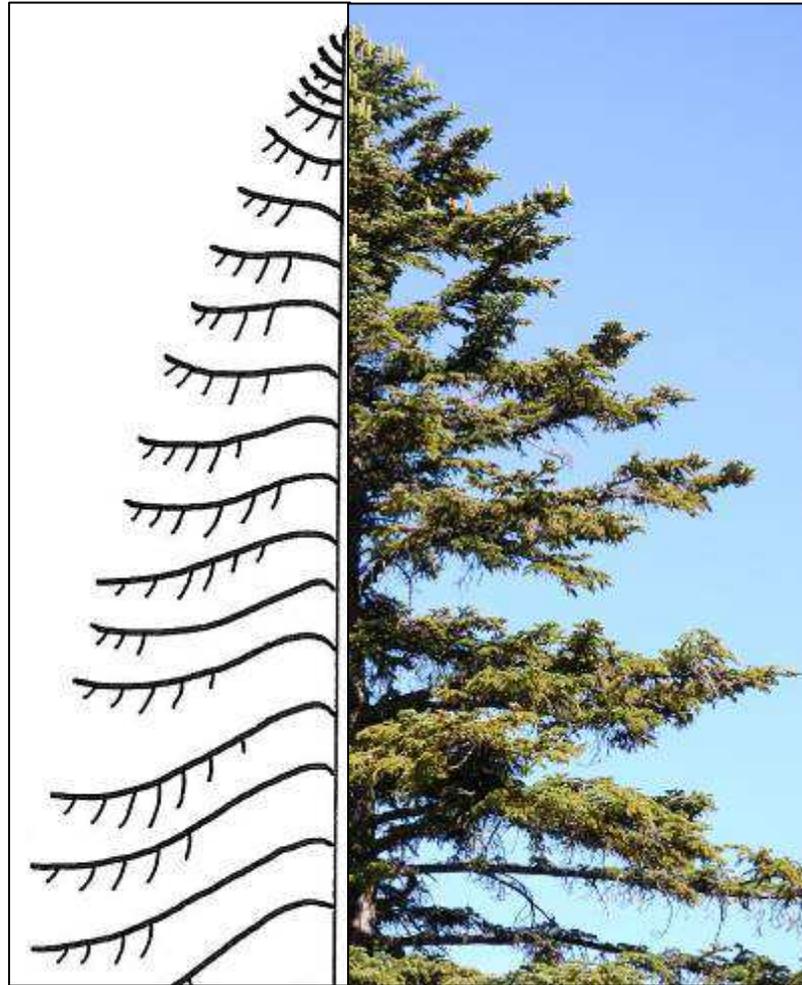


Figure 7 : sapin de type ARCHI S2 (Stress)

Dessin et photo: Ch. Drénou

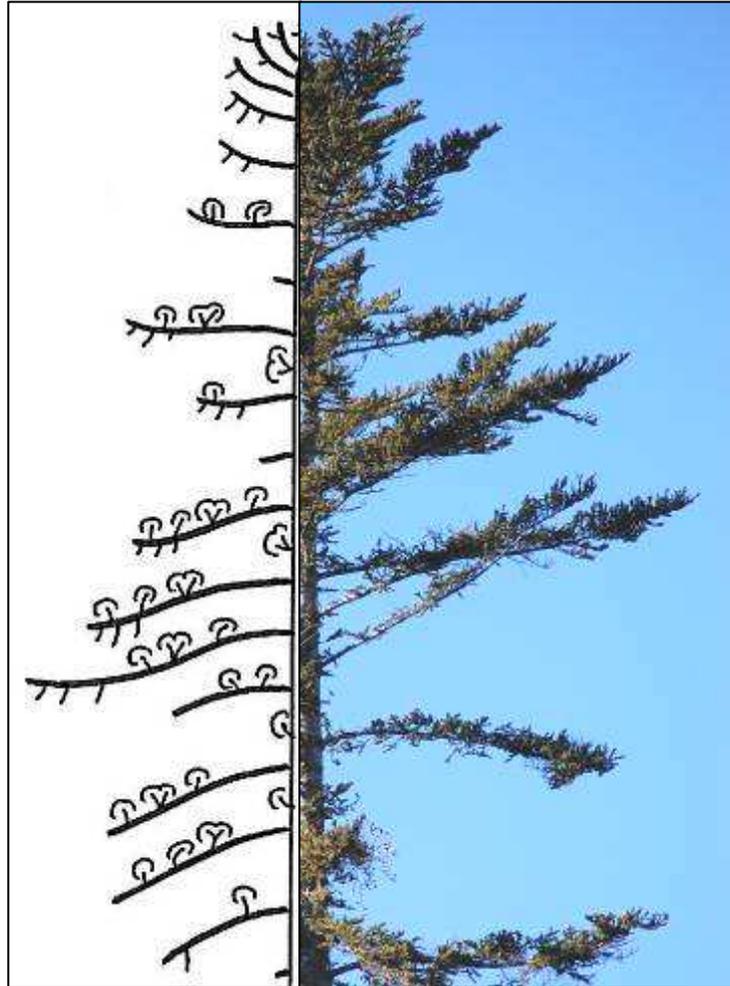


Figure 8 : sapin de type ARCHI I2 (dépérissement Irréversible)

Dessin et photo : Ch. Drénou

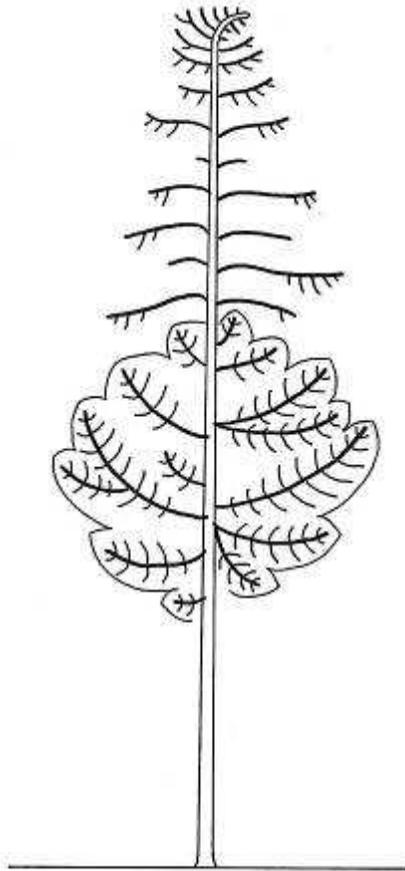
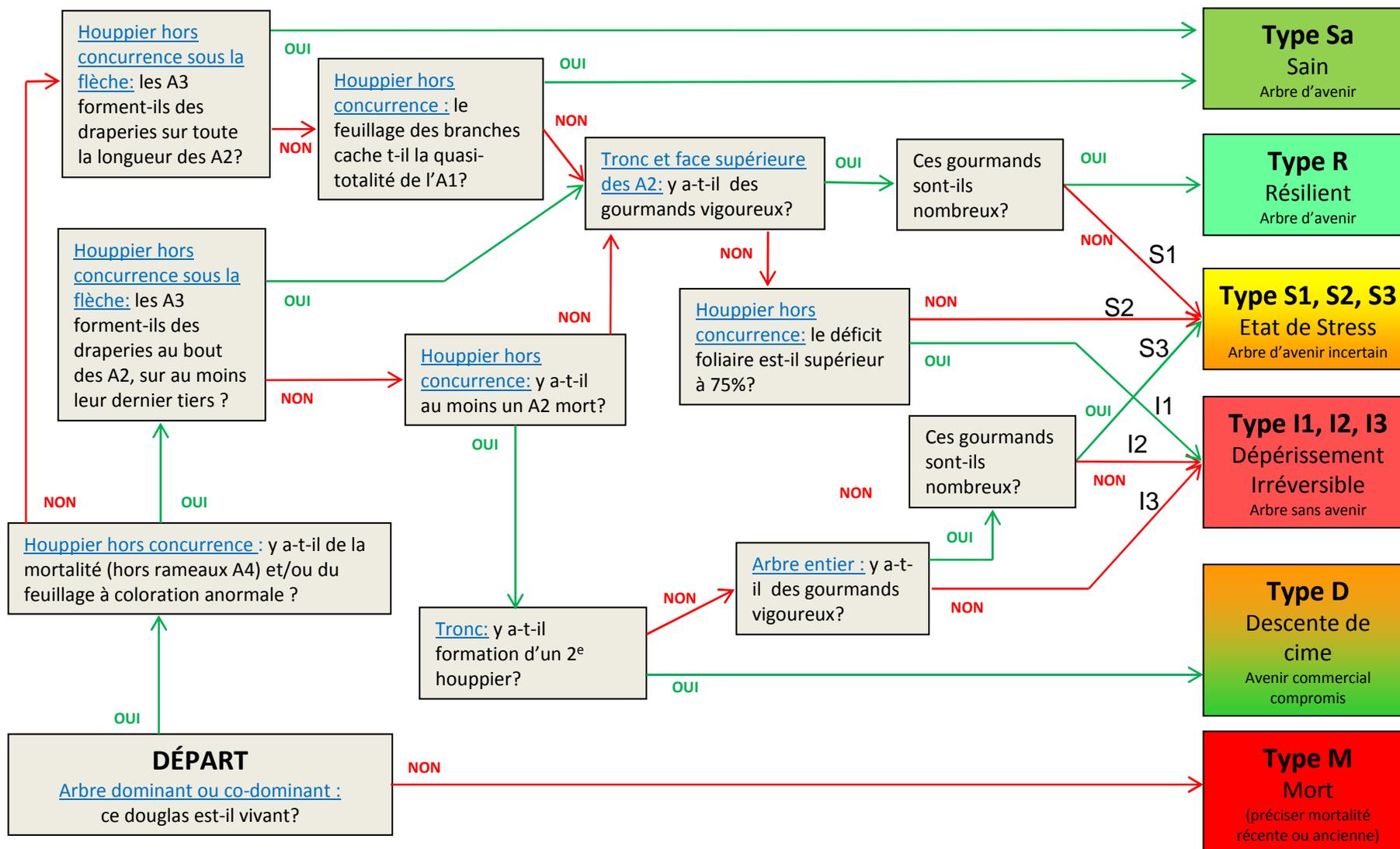


Figure 9 : sapin de type ARCHI D (Descente de cime)

Dessin : Ch. Drénou – Photo : J. Lemaire

La CLÉ ARCHI douglas

## Clé de détermination des types ARCHI chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)



**Houppier hors concurrence** : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.

**Flèche** : partie sommitale du tronc comprenant les six derniers étages de branches.

**A1, A2, A3, A4** : le tronc est l'axe d'ordre 1 (A1), il porte des étages de branches appelées A2, et ainsi de suite. L'ordre de ramification du douglas est de 4.

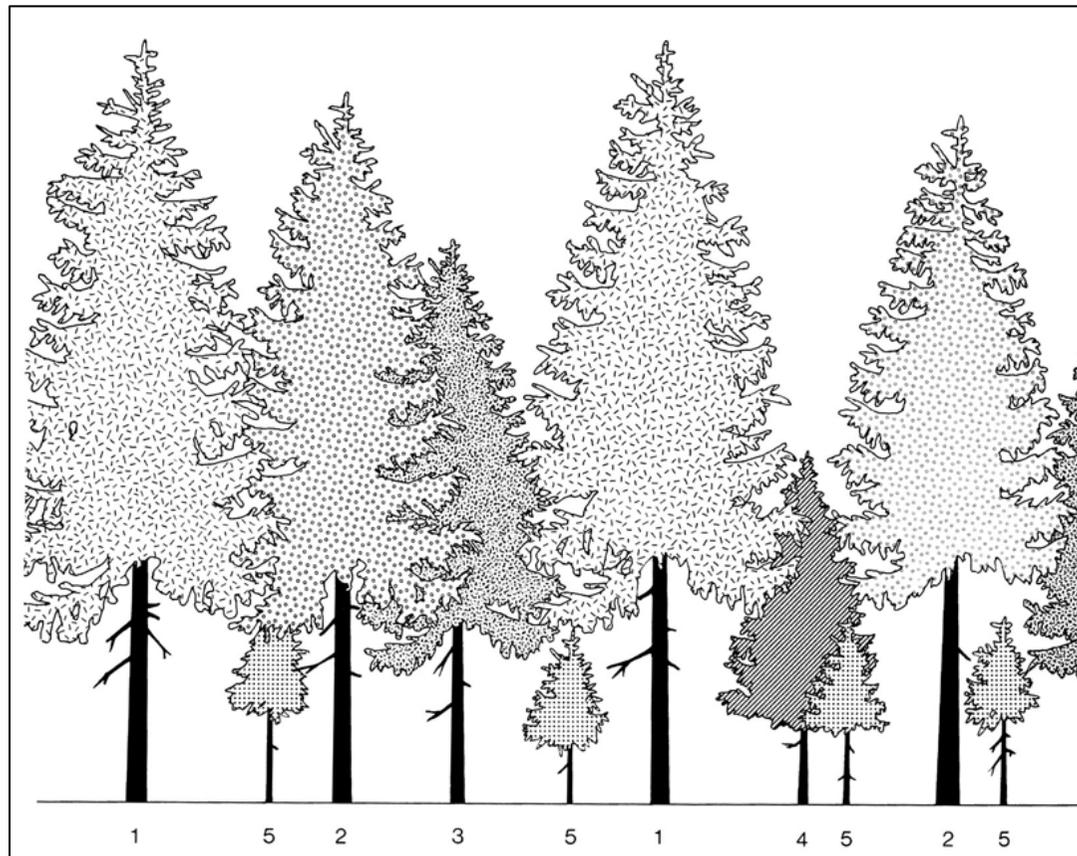
**Gourmands vigoureux** : gourmands plagiotropes ou orthotropes présentant une forte dominance apicale (existence d'un axe principal dominant), une forte croissance (net espacement entre les étages de ramifications), et une sexualité absente ou limitée à quelques cônes femelles.

**Gourmands nombreux** : gourmands présents sur plus de 50% des A2 et les recouvrant sur plus du quart de leur longueur. Sur l'A1, les gourmands sont nombreux lorsqu'ils cachent la partie du tronc qui les porte.

**2e houppier** : structure constituée de gourmands vigoureux portés par le tronc et hiérarchisés entre eux (certains étant dominants, d'autres dominés).

# Fig. 1. Statut des arbres

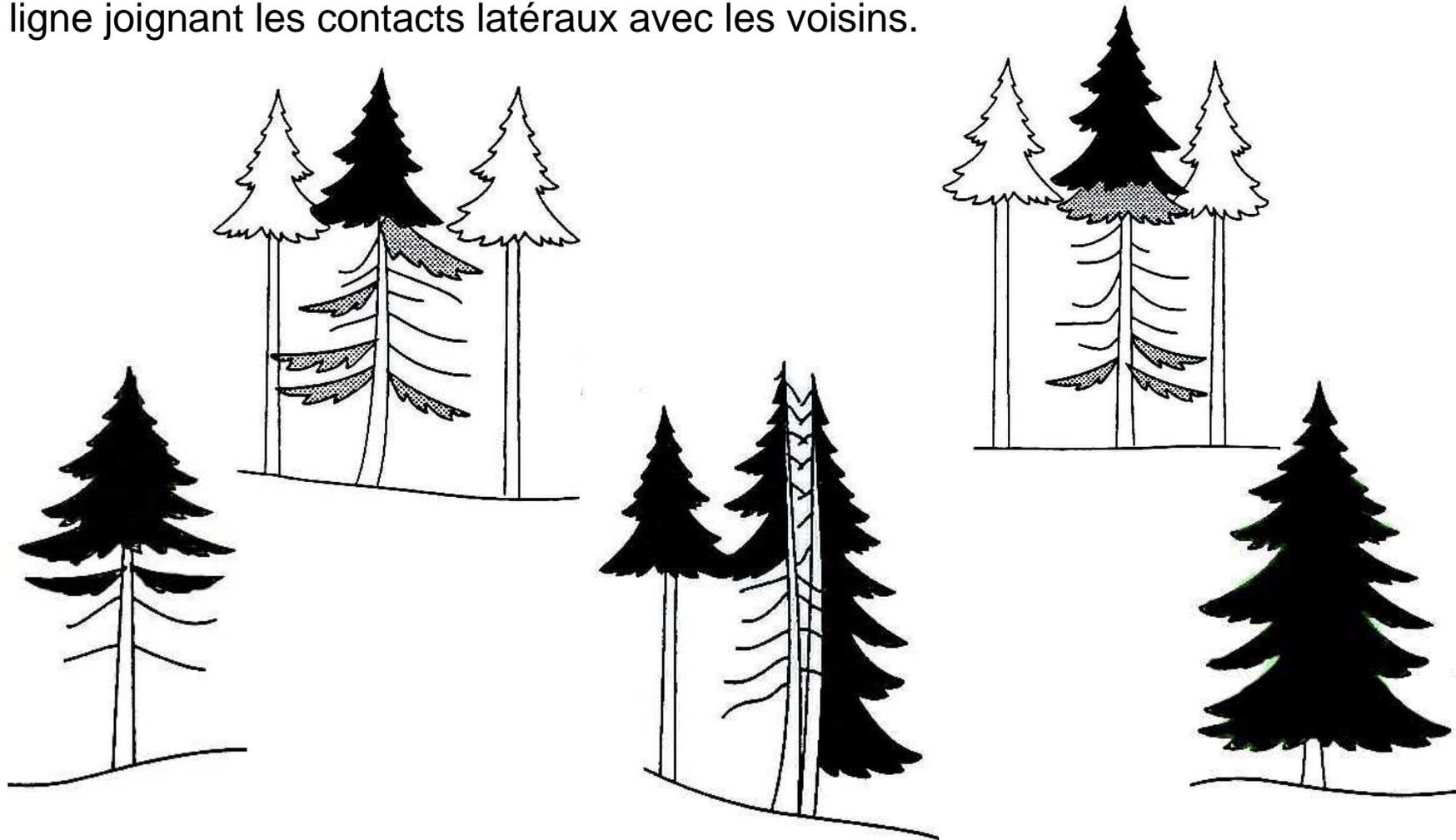
Afin de limiter les interférences entre problèmes phytosanitaires et symptômes liés à la concurrence ou au manque de lumière, ne sont pris en compte comme arbres-échantillons que des arbres **dominants ou co-dominants**.



1: dominant, 2: co-dominant, 3: dominé, 4: sous-étage, 5: strate arbustive

## Fig. 2. Houppier notable (D.S.F.)

Partie supérieure du houppier, « à la lumière », excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence. Situé au-dessus de la ligne joignant les contacts latéraux avec les voisins.



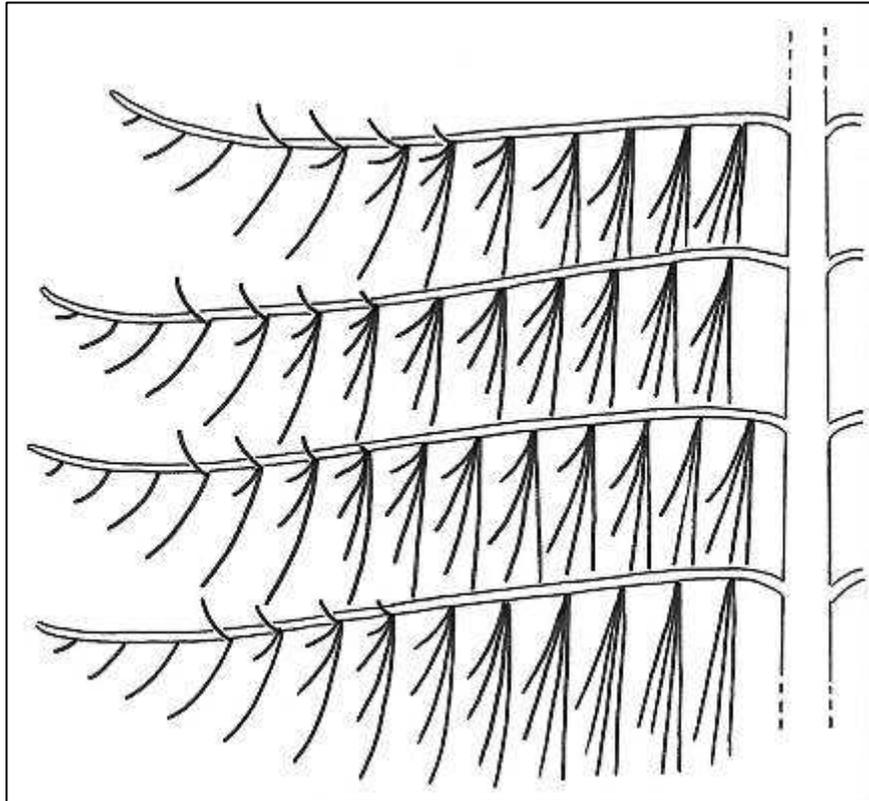


Figure 3 : A gauche : schéma de plusieurs branches de Douglas. Seuls les axes A2 et A3 sont représentés. On notera les draperies de rameaux A3. Celles-ci sont d'autant plus denses, plus longues et d'autant plus présentes sur toute la longueur des A2 que l'arbre est sain. A droite : photo d'une draperie de Douglas.

Dessin et photo: Ch. Drénou

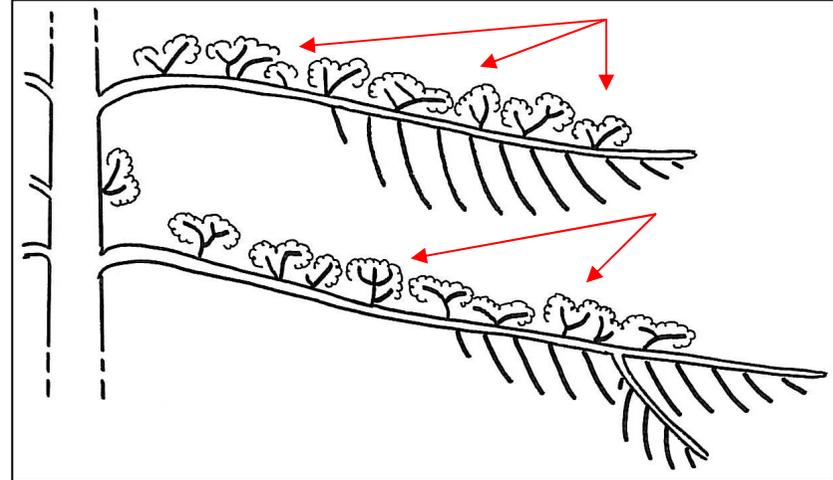
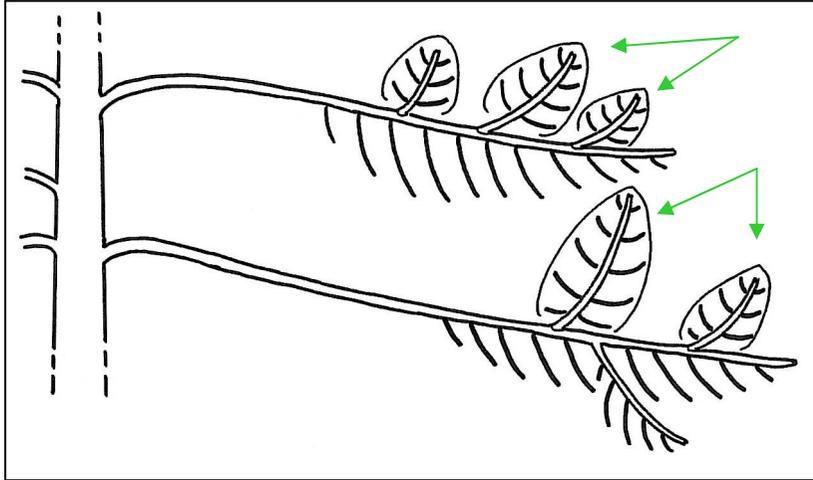


Figure 4 : représentation schématique de gourmands vigoureux de Douglas (fléchés, à gauche) et de gourmands non vigoureux (à droite).

Dessins originaux : Ch. Drénou

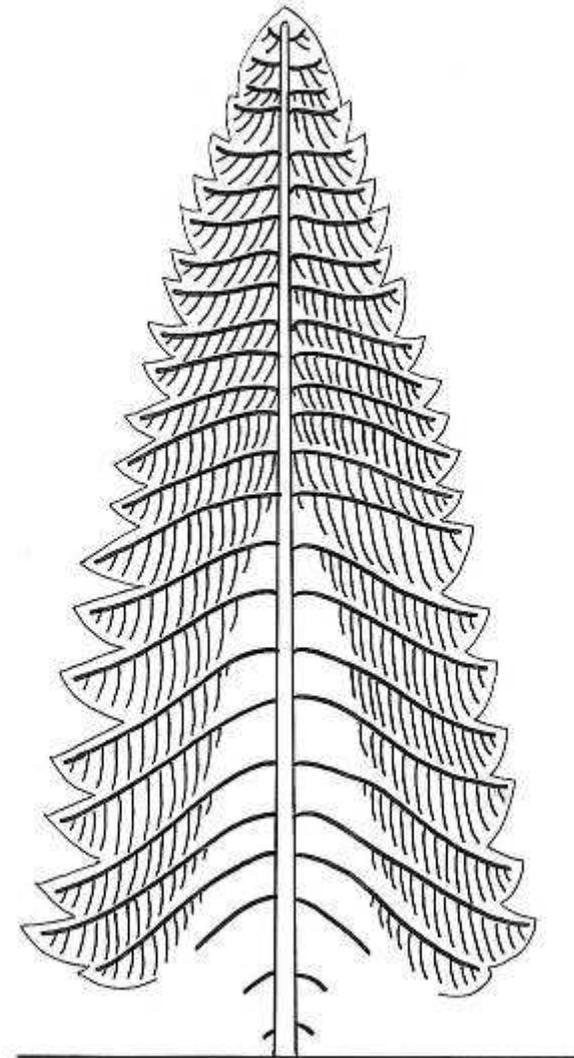


Figure 5 : Douglas de type ARCHI Sain

Dessin et photo: Ch. Drénou

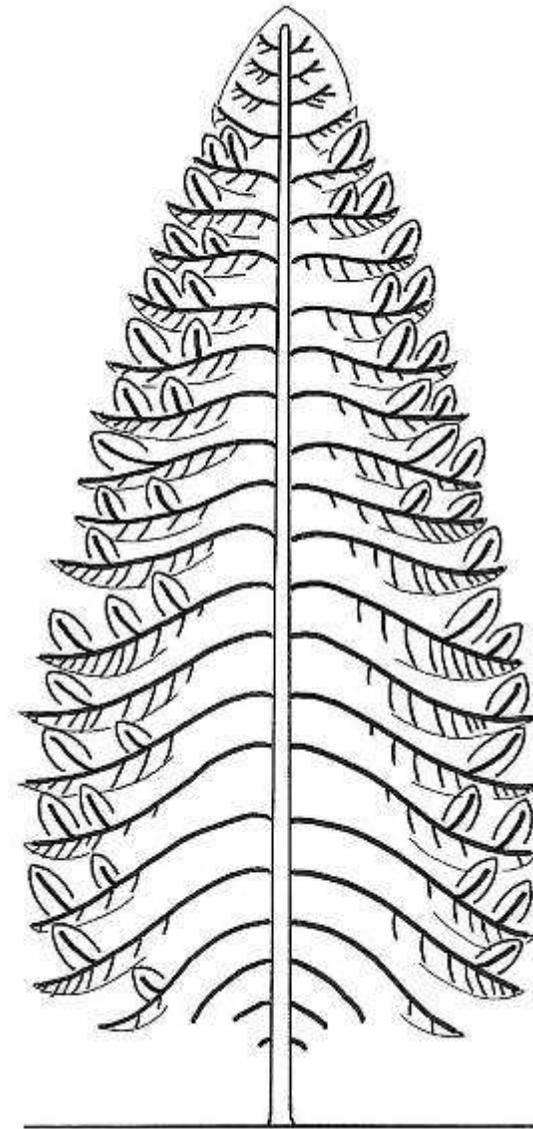


Figure 6 : Douglas de type ARCHI Résilient (avec gourmands plagiotropes)

Dessin et photo: Ch. Drénou

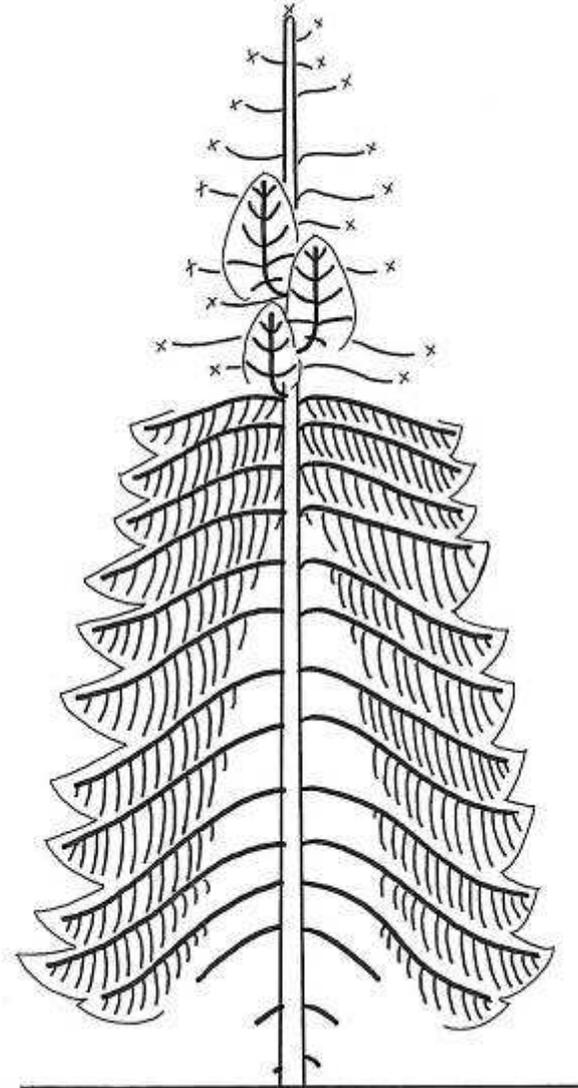


Figure 7 : Douglas de type ARCHI Résilient (avec gourmands orthotropes)

Dessin et photo: Ch. Drénou

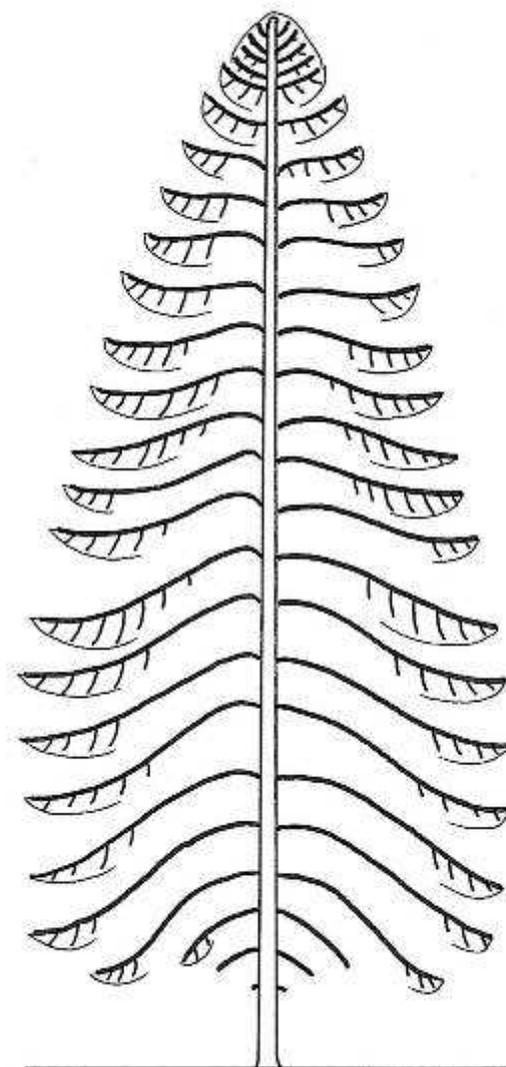


Figure 8 : Douglas de type ARCHI S2 (état de Stress)

Dessin et photo: Ch. Drénou

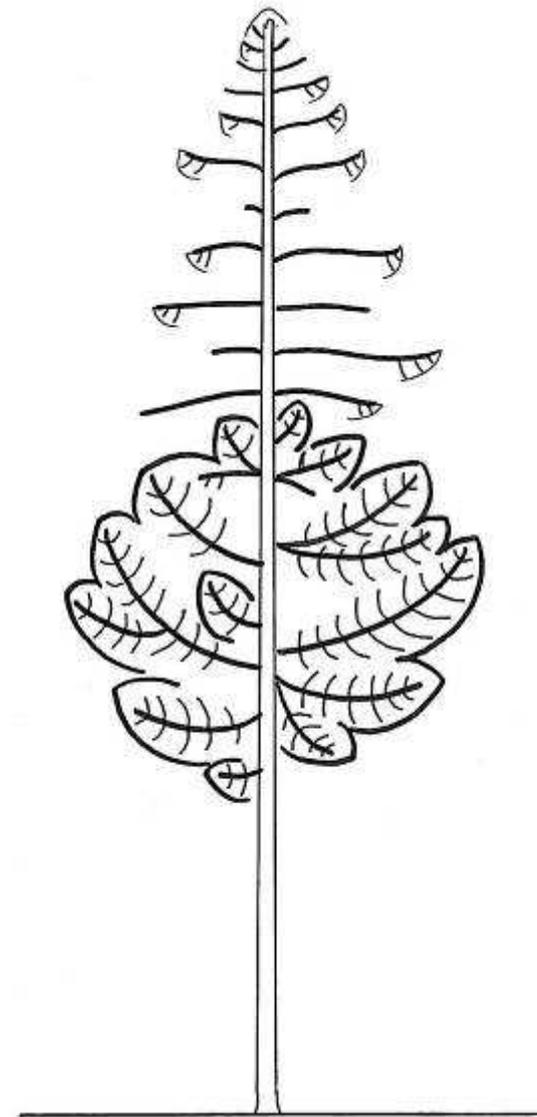
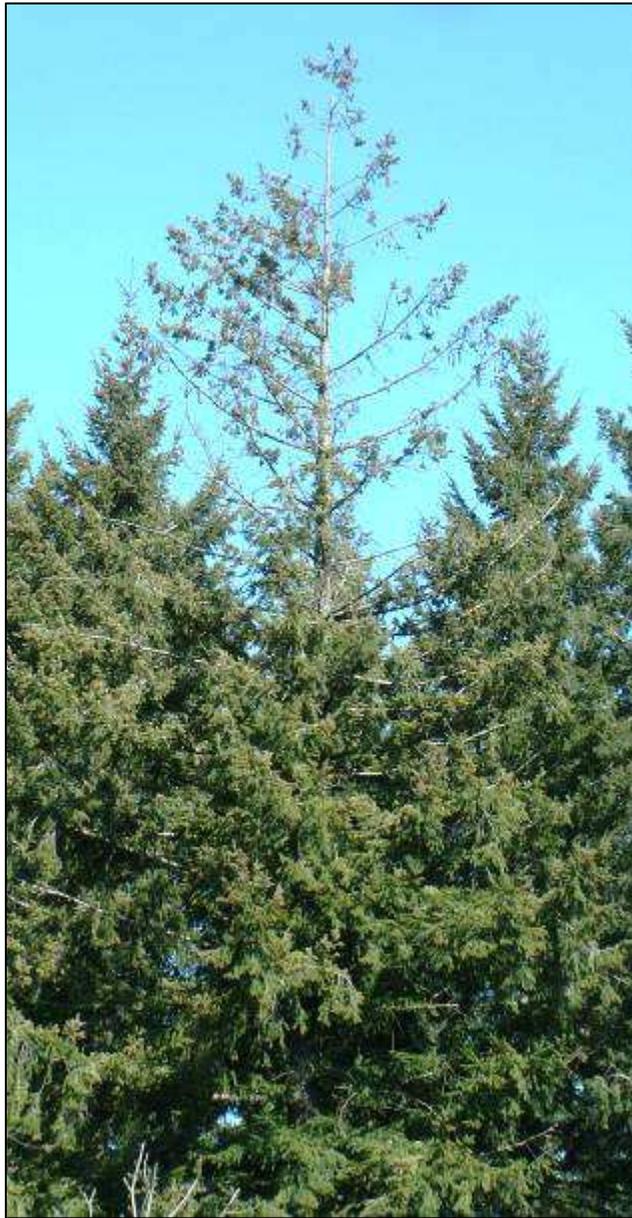


Figure 9 : Douglas de type ARCHI D (Descente de cime)

Deakin : Ch. Drépan - Photo : J. Lemaire

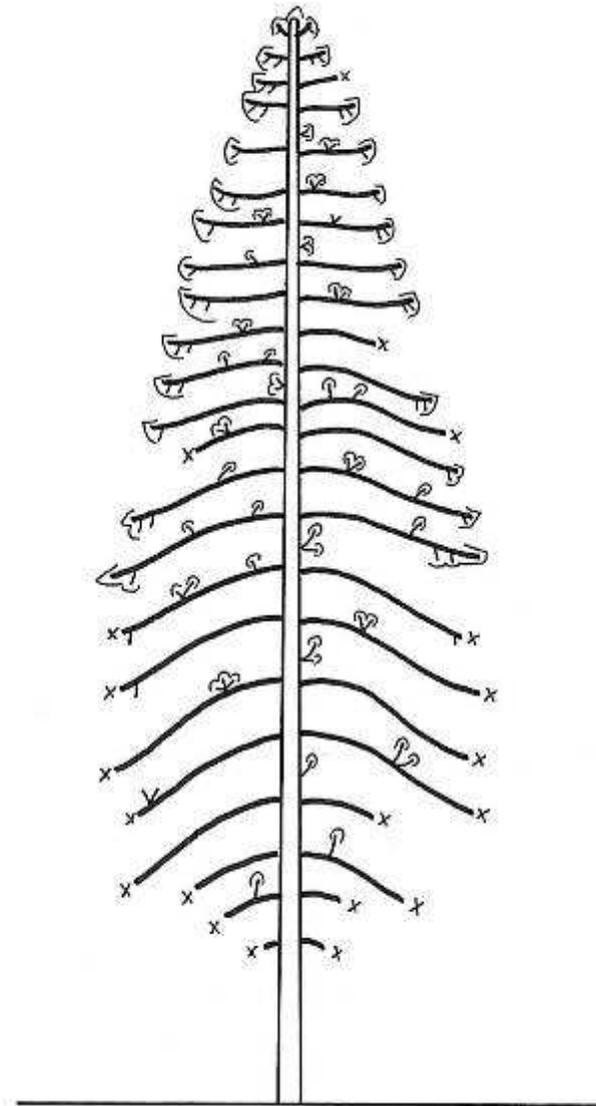
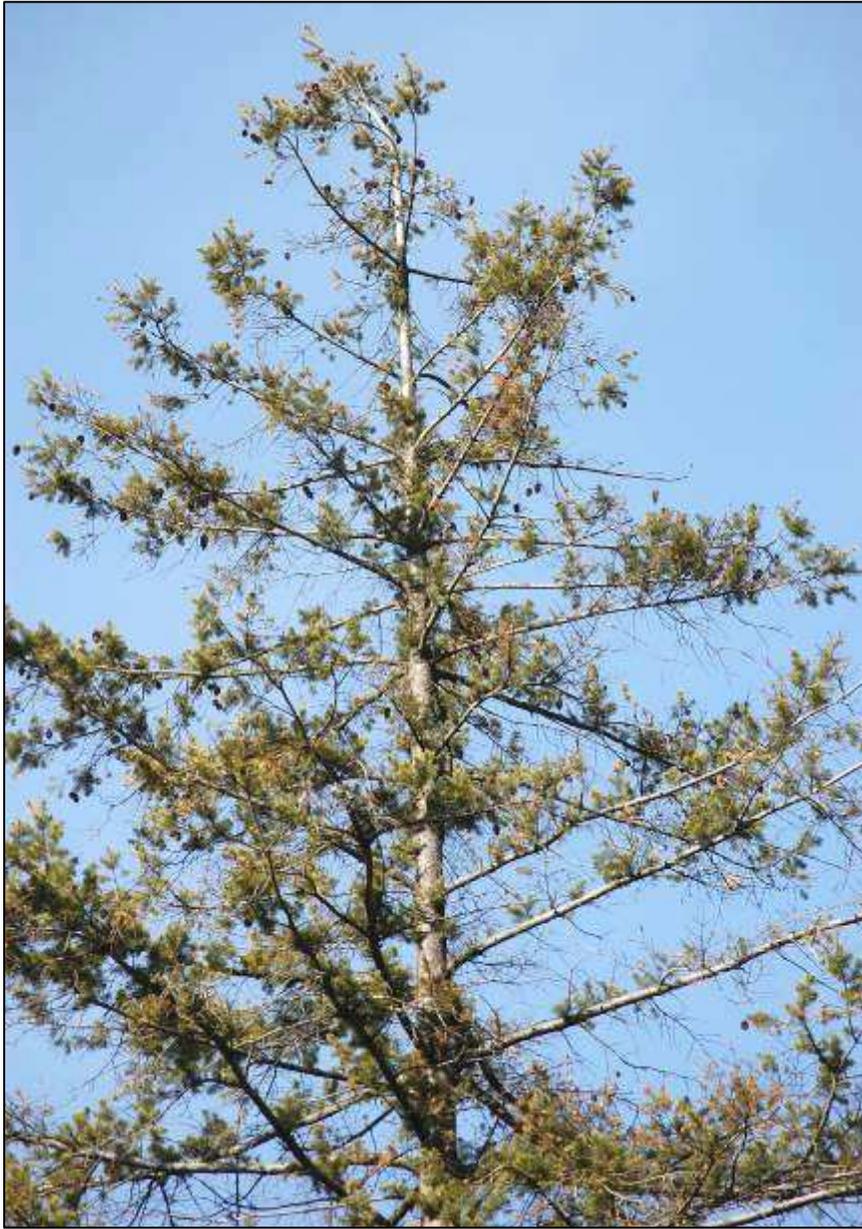
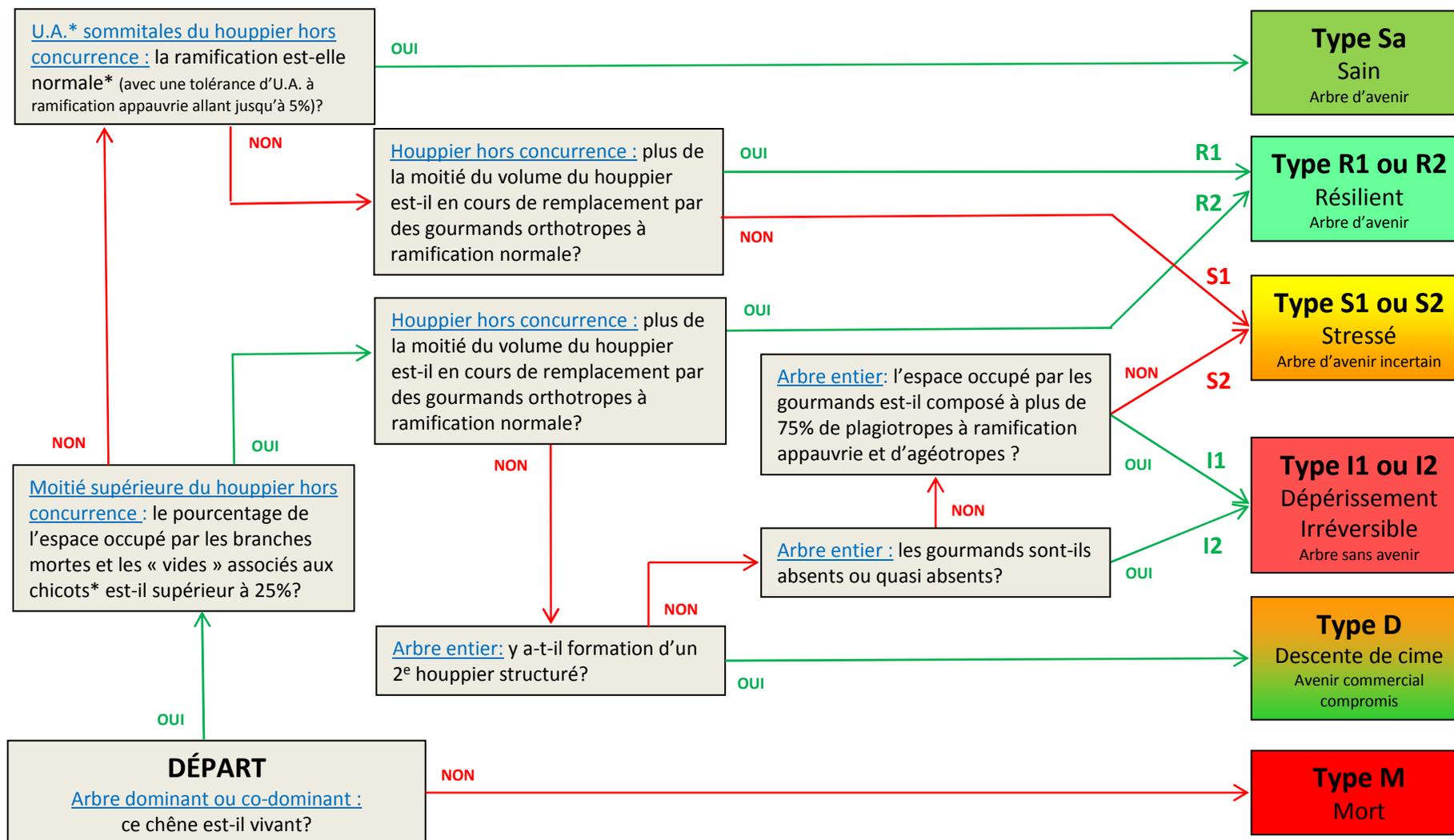


Figure 10 : Douglas de type ARCHI I2 (dépérissement Irréversible)

Dessin et photo: Ch. Drénou

La CLÉ ARCHI Chênes

## Clé de détermination des types ARCHI chez les chênes (*Q. robur*, *Q. petraea*, *Q. pubescens*)



**Houppier hors concurrence** : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.

**Chicot** : branche cassée de diamètre supérieur à 3 cm. Ne pas confondre « chicot » (plaie non recouverte par du bois) et « coude » (plaie recouverte).

**Unité architecturale (U.A.)** : architecture élémentaire de l'arbre. La première est à l'origine du tronc, les suivantes dérivent les unes des autres par réitération et forment le houppier. Le long d'une branche maîtresse, chaque U.A. réitérée est délimitée par deux fourches successives.

**A1, A2, A3, A4** : l'axe principal d'une U.A. est noté A1, il porte des axes secondaires A2, ceux-ci produisent des rameaux longs A3, lesquels donnent des rameaux courts A4.

**U.A. à ramification normale** : U.A. au contour quasi-pyramidal présentant un gradient de ramification depuis l'A1 jusqu'aux rameaux A3 et A4. La reconnaissance d'une ramification normale se fait par référence aux arbres sains situés à proximité de l'observateur.

**U.A. à ramification appauvrie** : U.A. de forme colonnaire présentant un passage brutal de l'A1 aux rameaux courts.

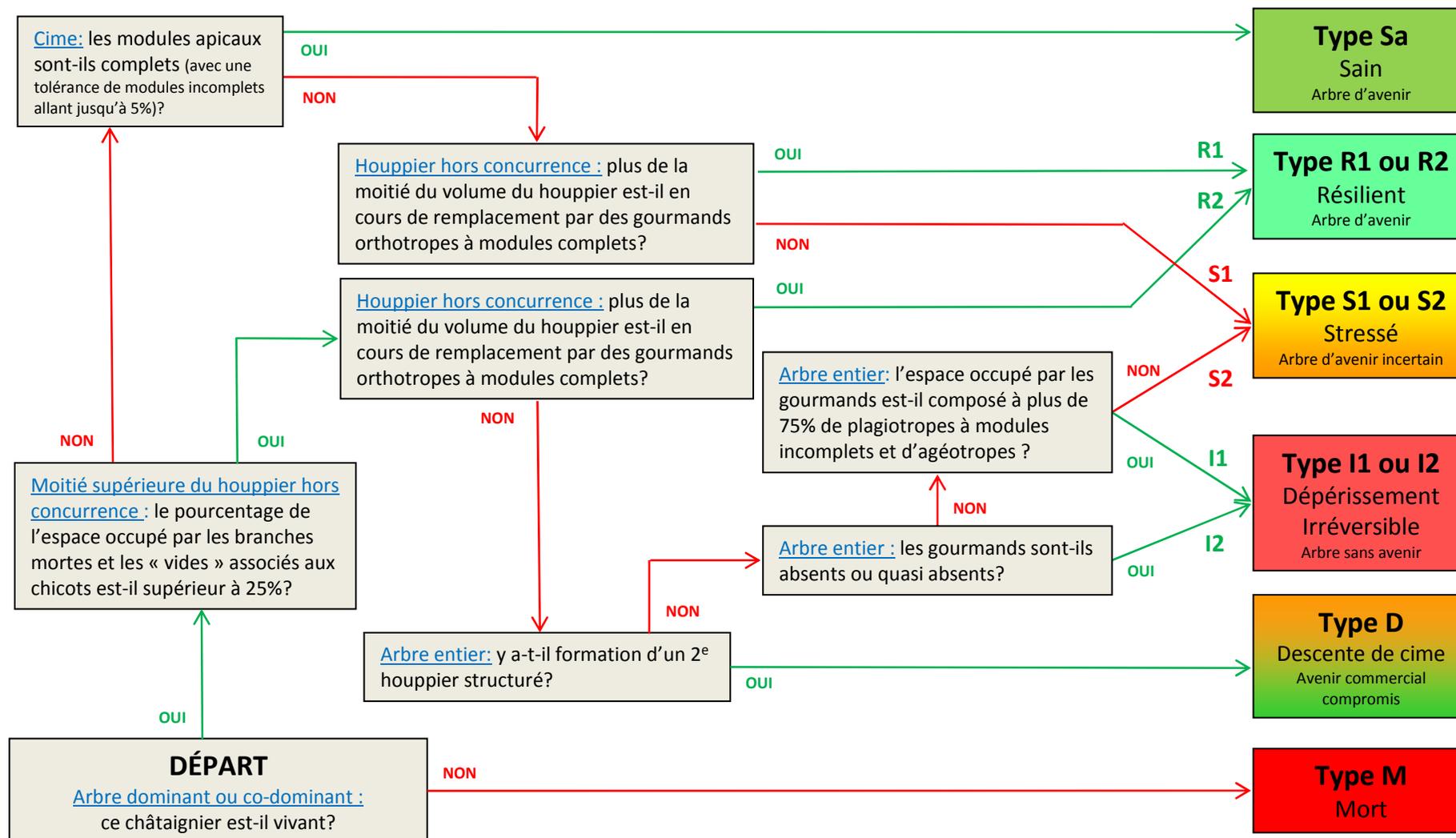
**2e houppier** : structure constituée de gourmands (parfois mélangés à des branches) hiérarchisés entre eux, certains étant dominants, d'autres dominés.

## Principe de la méthode ARCHI

Symptômes de dégradation	Processus de restauration	Etat de l'arbre adulte & appellation (encodage)
<p style="text-align: center;"><b>AUCUN à LÉGERS</b></p> <p>-Ramification en cime normale -% de l'espace occupé par les branches mortes et cassées inférieur à 25%</p>	-Observation inutile	<p style="text-align: center;">Etat normal <b>Arbre SAIN</b> (Sa)</p>
<p style="text-align: center;"><b>MODÉRÉS</b></p> <p>-Ramification en cime appauvrie -% de l'espace occupé par les branches mortes et cassées inférieur à 25%</p>	<p style="text-align: center;"><b>LATENT</b></p> <p>-Gourmands absents, rares ou récents</p>	<p style="text-align: center;">Ecart à la normale <b>Arbre STRESSÉ</b> (S1)</p>
	<p style="text-align: center;"><b>ANTICIPÉ</b></p> <p>-Présence de gourmands orthotropes à ramification normale prenant le relais des branches à ramification appauvrie avant même que celles-ci ne meurent</p>	<p style="text-align: center;">Retour à la normale <b>Arbre RÉSILIENT (R1)</b></p>
<p style="text-align: center;"><b>IMPORTANTES</b></p> <p>-% de l'espace occupé par les branches mortes et cassées supérieur à 25%</p>	<p style="text-align: center;"><b>PRÉPONDÉRANT</b></p> <p>-Présence de gourmands orthotropes à ramification normale prenant le relais des branches mortes et cassées (l'effectif de ces gourmands importe moins que la dynamique de restauration)</p>	<p style="text-align: center;">Retour à la normale <b>Arbre RÉSILIENT</b> (R2)</p>
	<p style="text-align: center;"><b>TRÈS FAIBLE en cime IMPORTANT en dessous</b></p> <p>-Présence de gourmands hiérarchisés à ramification normale (orthotropes et plagiotropes) formant un deuxième houppier emboîté dans le houppier d'origine ou inséré en dessous</p>	<p style="text-align: center;">Retour à un état proche de la normale <b>Arbre en DESCENTE de CIME</b> (D)</p>
	<p style="text-align: center;"><b>INCERTAIN</b></p> <p>-Présence d'un mélange de gourmands non hiérarchisés : plagiotropes à ramification normale, orthotropes à ramification appauvrie, agéotropes et plagiotropes à ramification appauvrie ; les deux dernières catégories représentant moins de 75% de l'espace occupé par la totalité des gourmands.</p>	<p style="text-align: center;">Ecart à la normale <b>Arbre STRESSÉ</b> (S2)</p>
	<p style="text-align: center;"><b>AVORTÉ</b></p> <p>-Gourmands quasi absents (type I2), ou au contraire : gourmands abondants occupant un espace dont plus de 75% est composé d'agéotropes et de gourmands plagiotropes à ramification appauvrie (type I1).</p>	<p style="text-align: center;">Point de non-retour à la normale <b>Arbre en dépérissement IRRÉVERSIBLE</b> (I1 et I2)</p>

La CLÉ ARCHI Châtaignier

## Clé de détermination des types ARCHI chez le châtaignier (*Castanea sativa*)



**Houppier hors concurrence** : partie du houppier excluant les zones inférieures ou latérales soumises à des phénomènes de concurrence.

**Chicot** : branche cassée de diamètre supérieur à 3 cm. Ne pas confondre « chicot » (plaie non recouverte par du bois) et « coude » (plaie recouverte).

**Module** : le châtaignier à une croissance sympodiale; ses allongements annuels sont appelés : « modules ».

**Module complet** : un module de châtaignier qualifié de « complet » comprend 4 à 5 zones morphologiques.

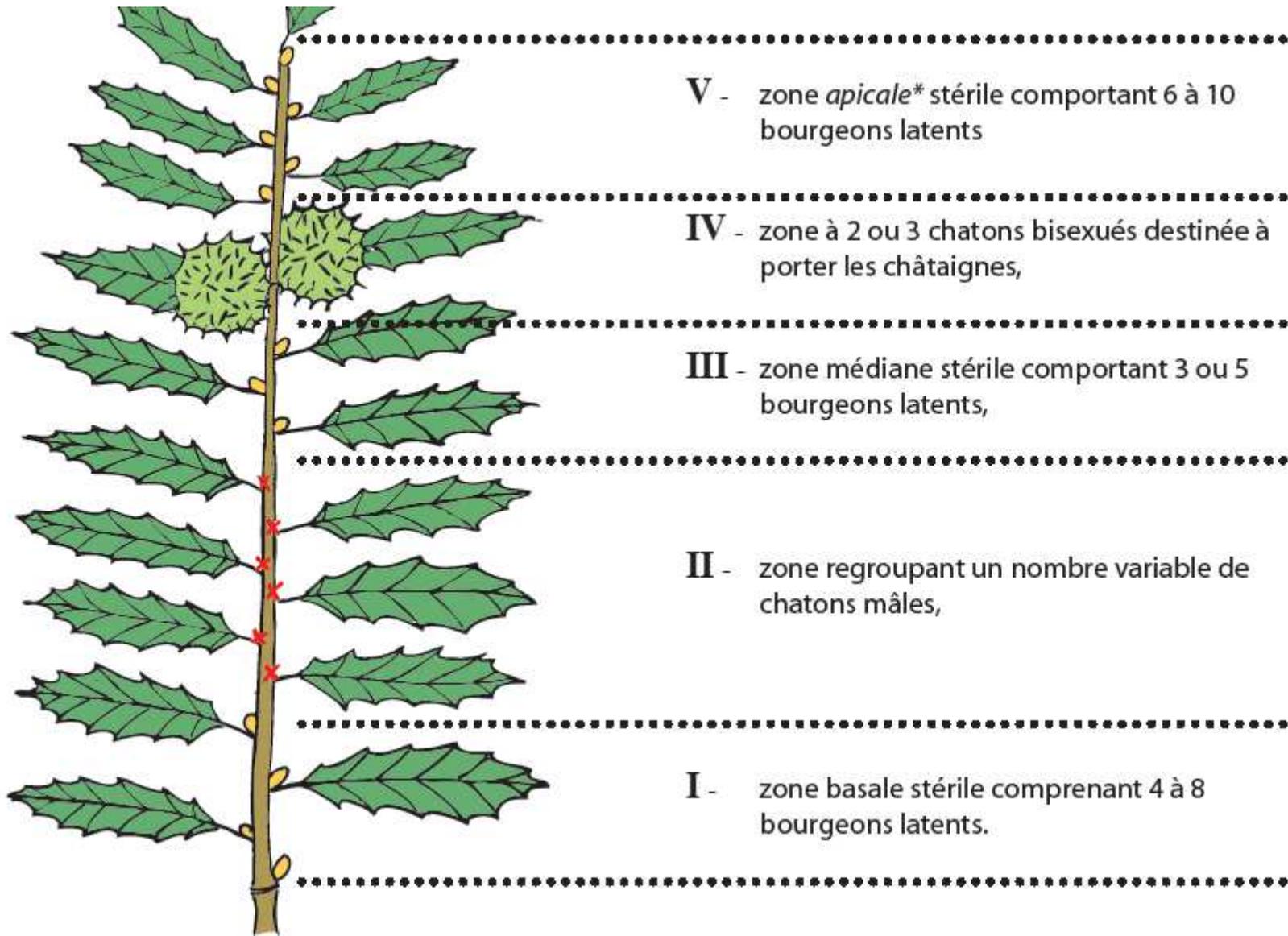
**Gourmand orthotrope**: gourmand à direction de croissance verticale et à symétrie axiale.

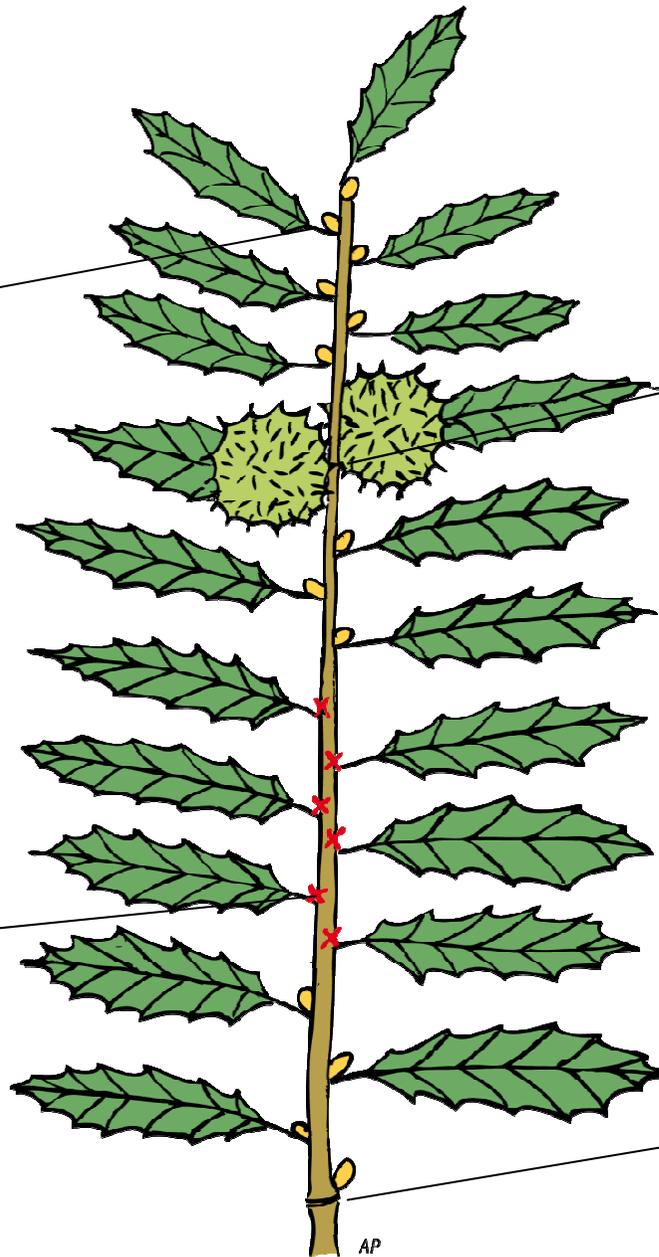
**Gourmand plagiotrope**: gourmand à direction de croissance horizontale ou oblique et à symétrie bilatérale.

**Gourmand agéotrope**: gourmand sans direction de croissance privilégiée, sans dominance apicale et à très faible croissance.

**2e houppier** : structure constituée de gourmands vigoureux et hiérarchisés entre eux (certains étant dominants, d'autres dominés).

## Les 5 zones morphologiques d'un module de châtaignier





- X cicatrice de chaton mâle**
- o bourgeon latent**

Module à 5 zones

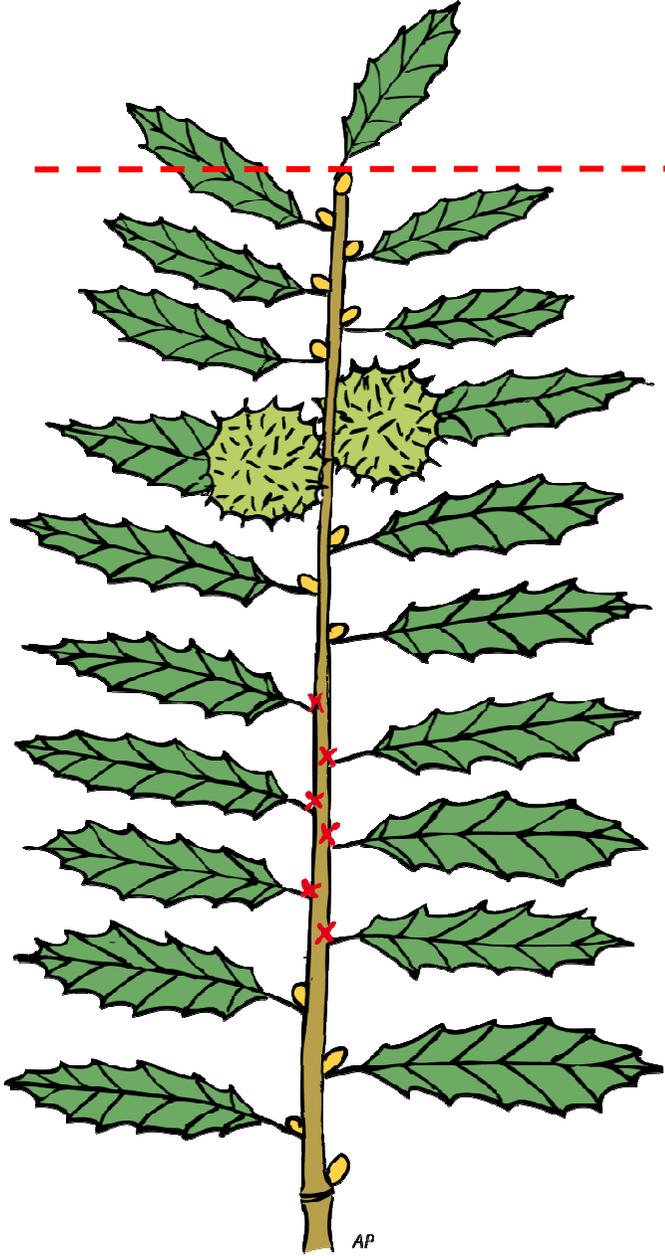
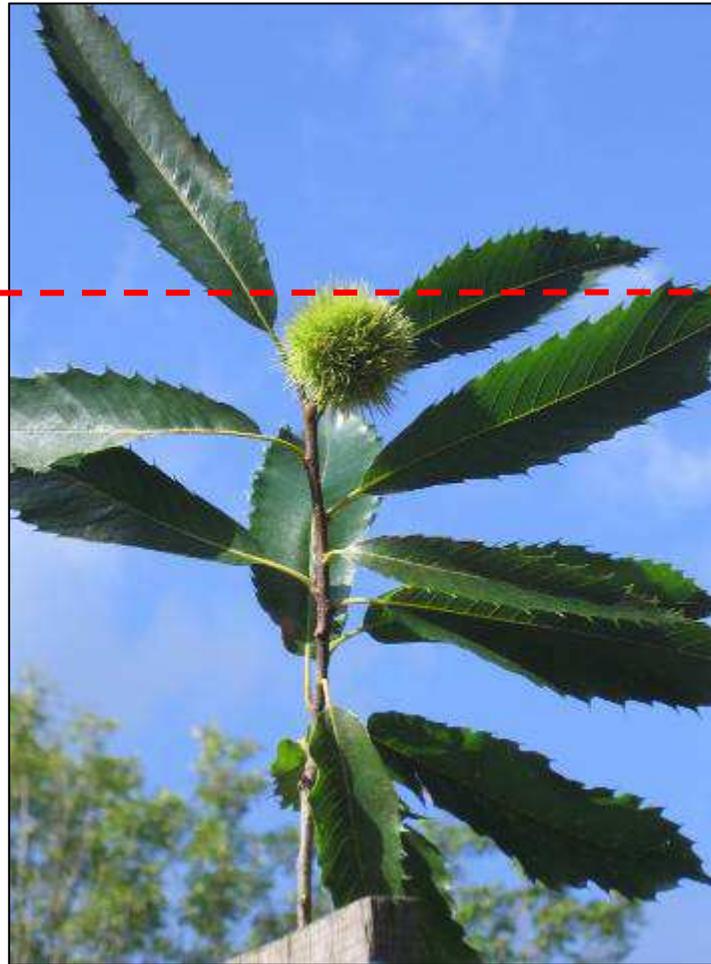
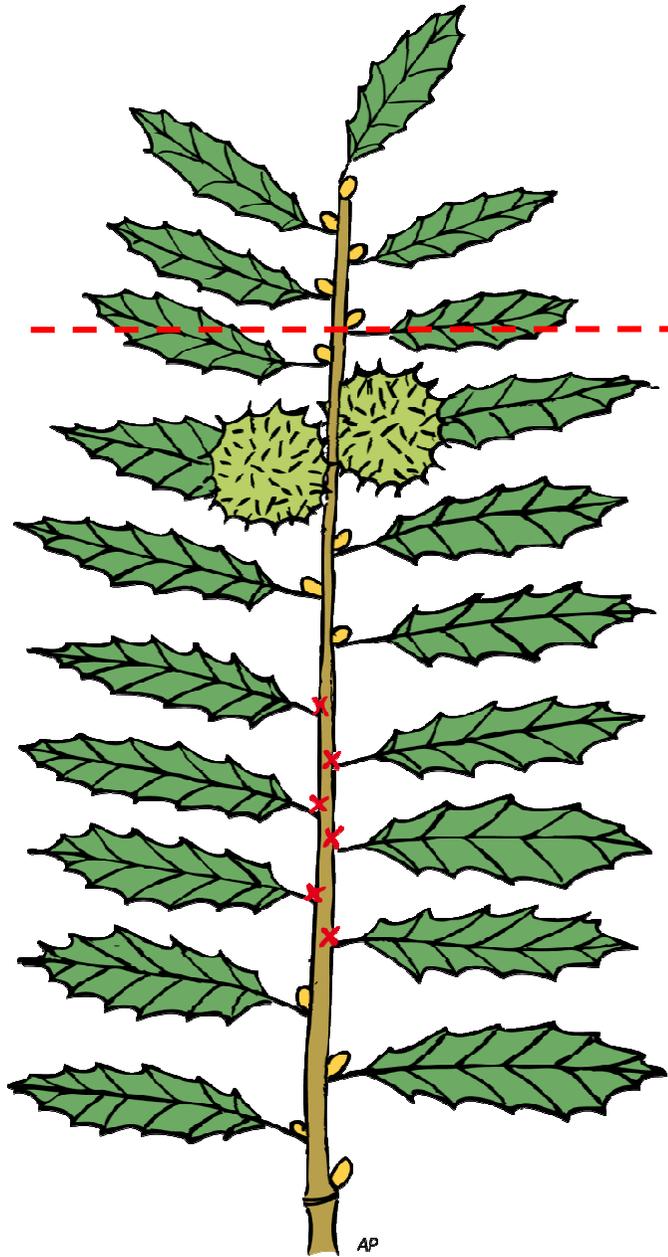


Schéma : A. Pavie - Photo : Ch. Drénou



Photo : Ch. Drénou

Module à 5 zones



Module à 4 zones



Photo : Ch. Drénou

## Module à 4 zones



Photo : J. Lemaire

Module à 4 zones

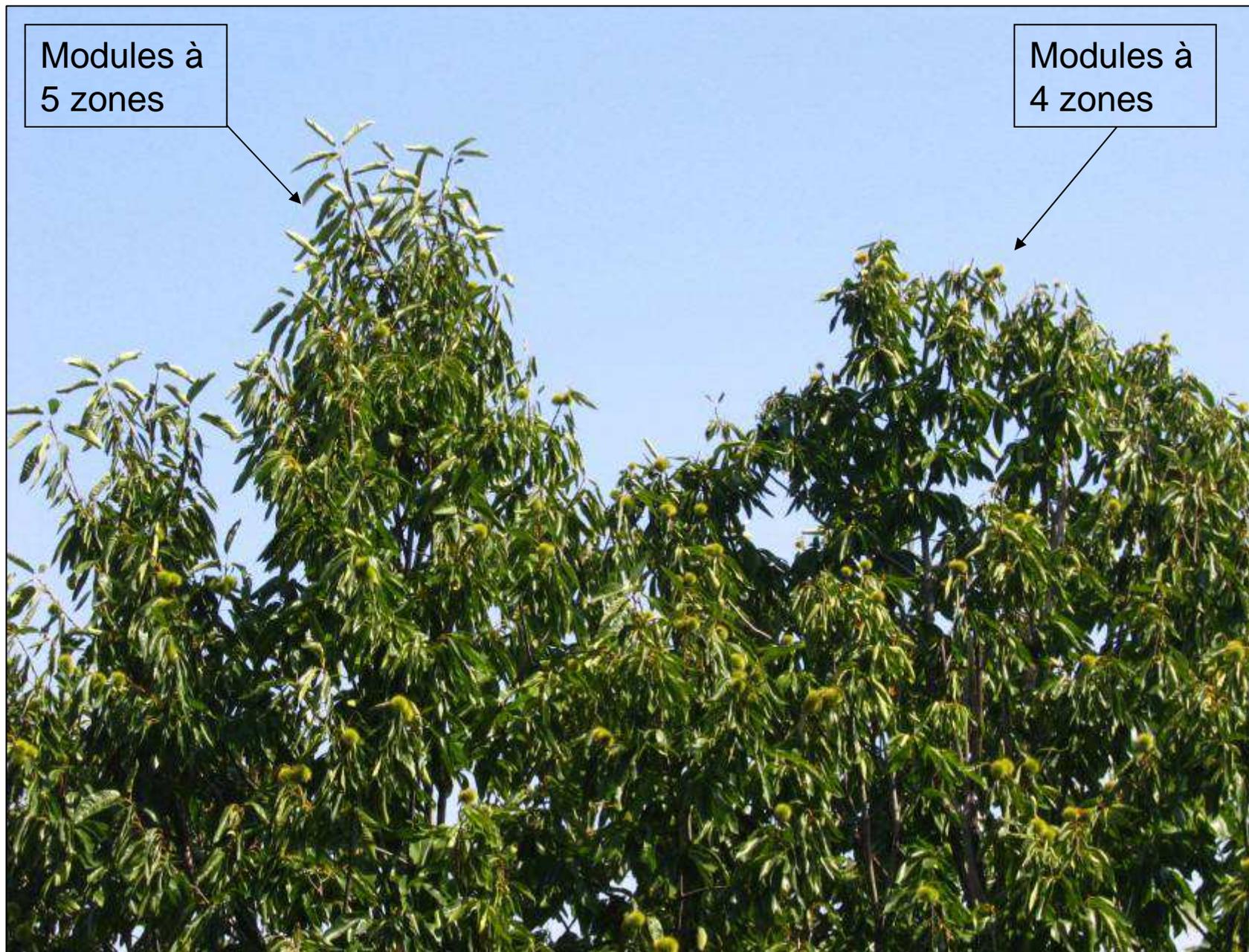
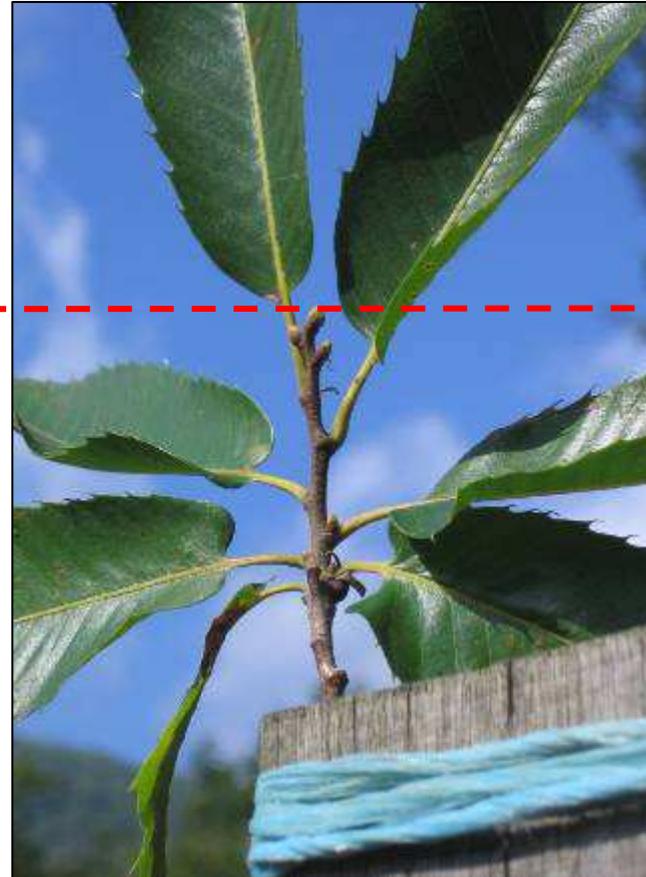
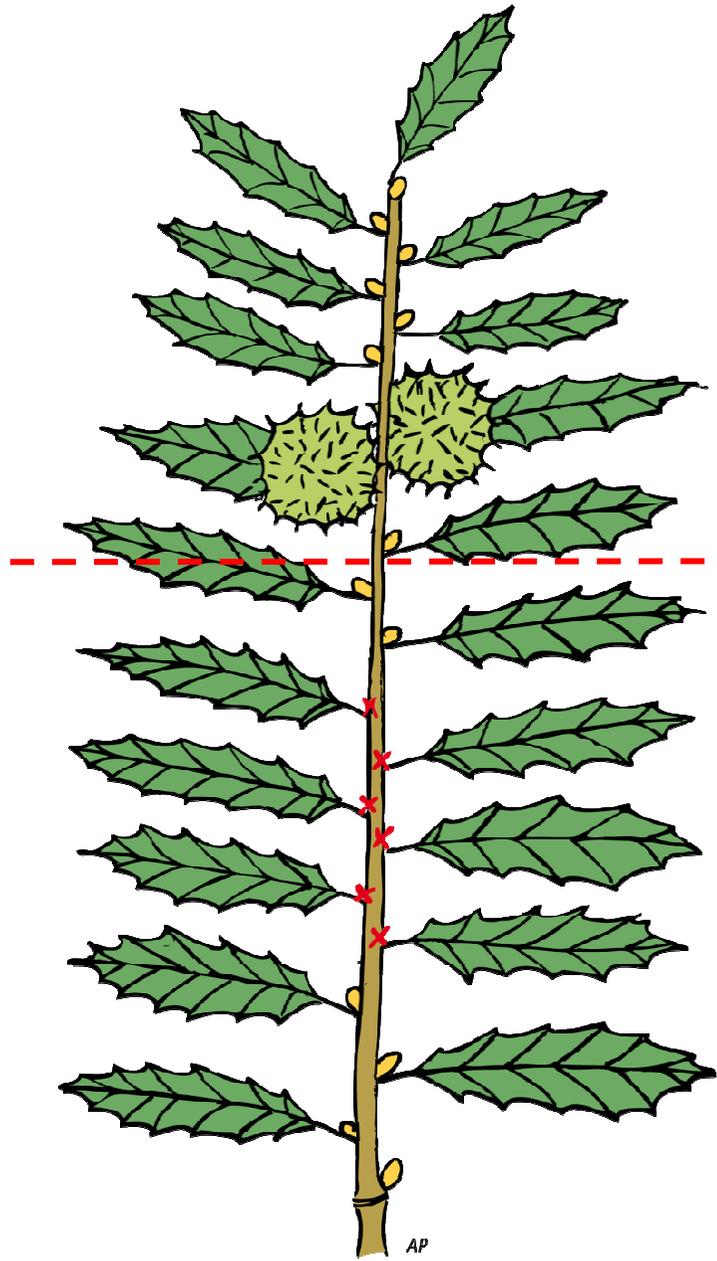
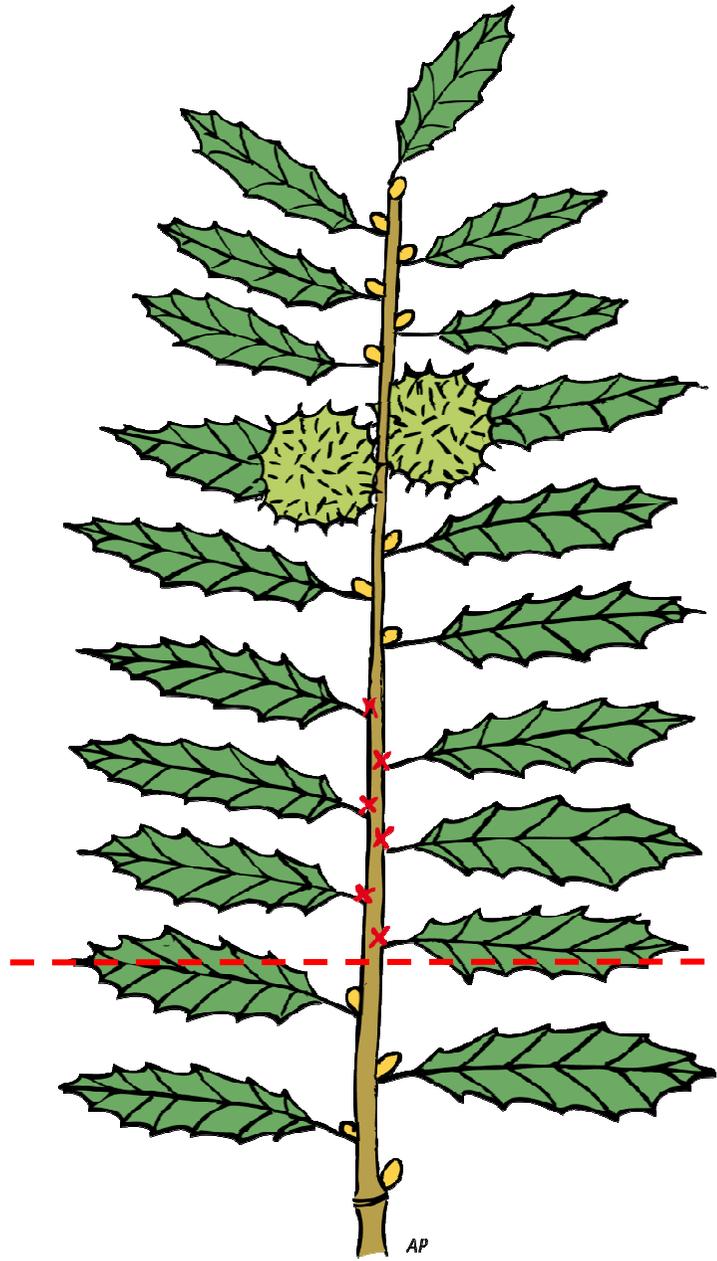


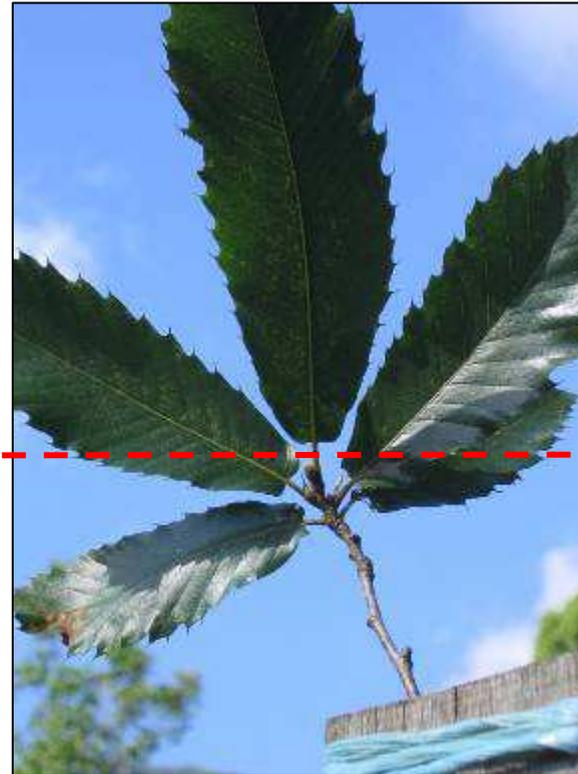
Photo : Ch. Drénou

## Module à 3 zones





Module à 1 zone





Module à 1 zone



## Type Sain



Photo : F. Torre

## Type S2 (Stressé)



Photo : F. Torre

## Type Descente de Cime

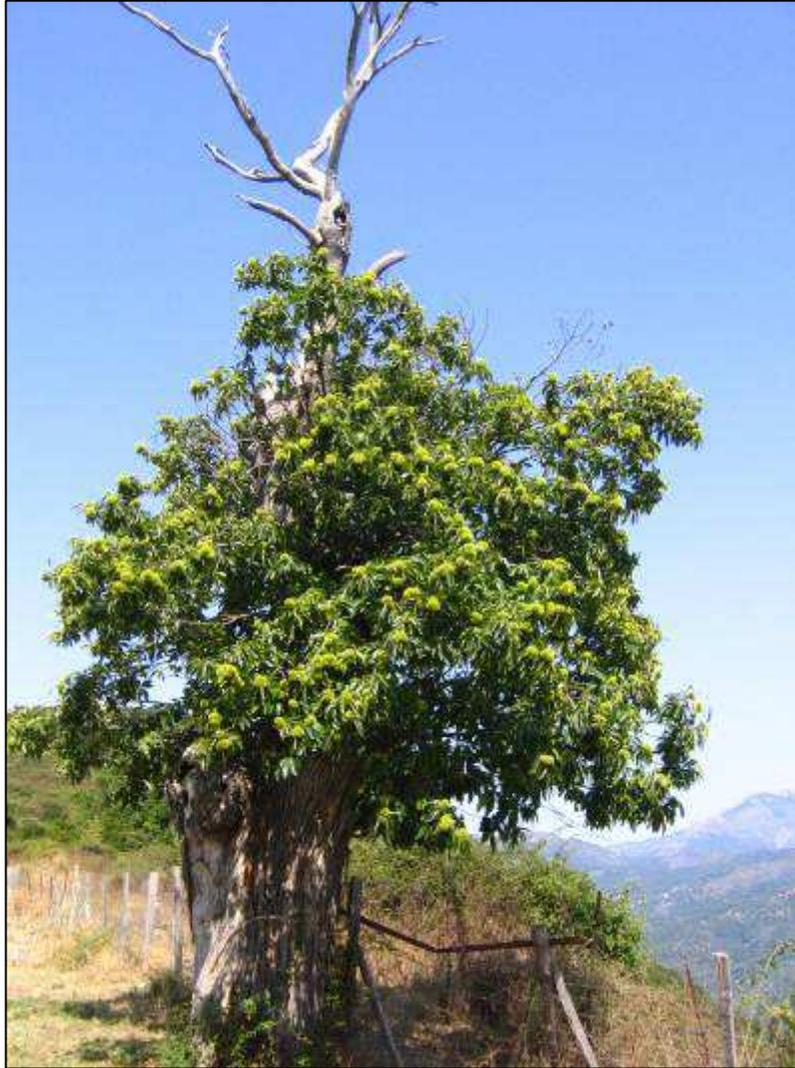
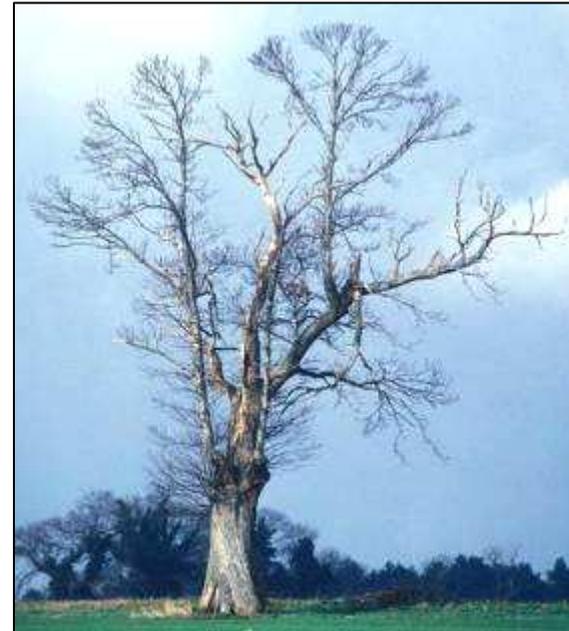
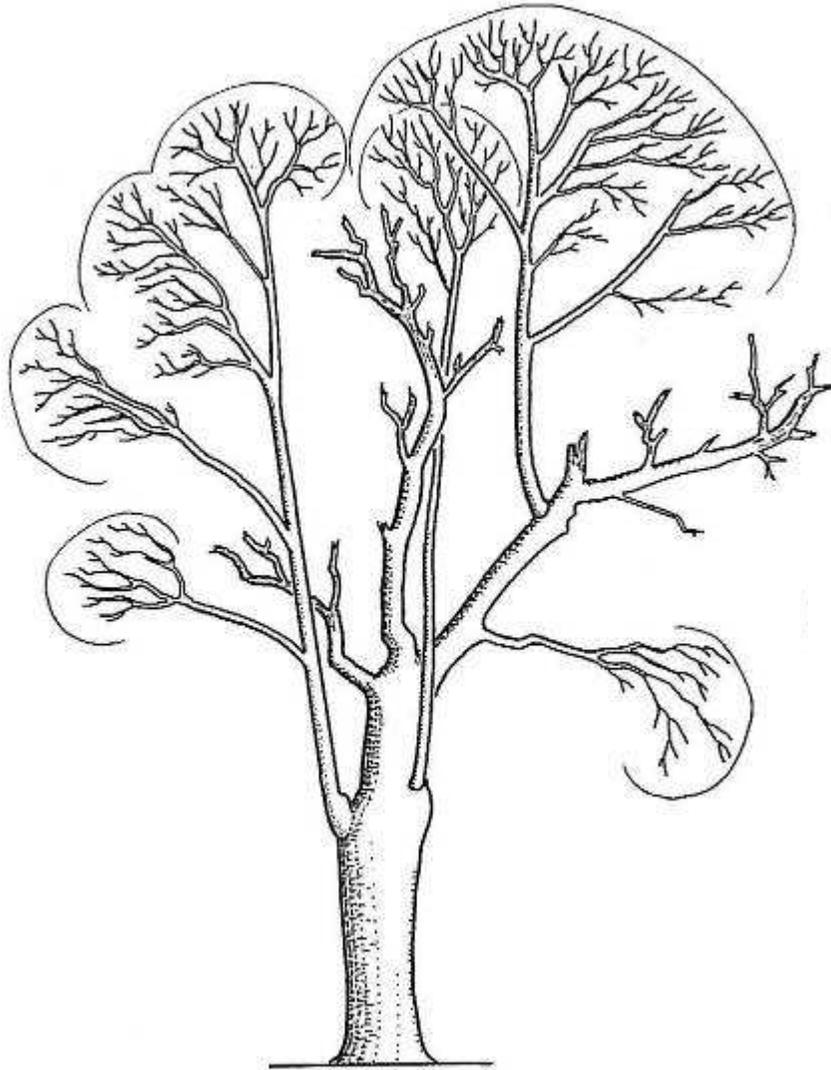


Photo : Ch. Drénou



A.PAVIE

## Type R2 (Résilient)



Dessin et photo : Ch. Drénou

## Type R2 (Résilient)



## Type R2 (Résilient)



Photo: Ch. Dréno

## Type I1 (dépérissement Irréversible)



Photo: P. Gonin

## Type I2 (dépérissement Irréversible)

