

Rapport technique 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.

CIRAD-AMAP Montpellier : Sylvie Sabatier, Yves Caraglio

IDF-Toulouse : Christophe Drénou

INRA-AMAP Montpellier : Michael Guérout, François Paillet

INRA-URFM Avignon : Nicolas Mariotte, Hendrik Davi



Sommaire

LES ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROJET

LE DIAGNOSTIC ONTOGENIQUE : DIAGNOSTIC DU STADE DE DEVELOPPEMENT DE L'ARBRE

1. Concepts et méthode : l'analyse architecturale
2. Résultats
3. Conclusions et perspectives

LES CRITERES ARCHITECTURAUX

1. Espèces étudiées
2. Méthodes
3. Campagnes d'observation et protocole de mesures
4. Résultats : Des combinaisons de critères comme aide à la détermination du niveau de sensibilité d'une espèce aux aléas climatiques : diagnostic de l'état de l'arbre
5. Résultats : nouvelles connaissances sur la signification de marqueurs morphologiques
6. Conclusions et perspectives

LA METHODE DES CLEFS ARCHI

1. Le principe des clés ARCHI
2. Exemple de deux clés ARCHI : sapin pectiné et chênes
3. Les innovations des clés ARCHI
4. Validation des clés ARCHI
5. Les limites des clés ARCHI
6. Témoignage de deux utilisateurs de la méthode ARCHI
7. Comparaison des méthodes DEPEFEU et ARCHI
8. Les formations relatives aux clés ARCHI

APPLICATION DIAGARCHI (DIAGNOSTIC ARCHITECTURAL SUR SUPPORT NOMADE)

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

FORMATION AUX OUTILS PROPOSES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

PUBLICATIONS RELATIVES AUX CLEFS ARCHI

Sommaire des annexes

Annexe 1. Le comité de suivi

Annexe 2. Sommaire de la formation organisée pour le DSF le 28 mai 2013

Annexe 3. Le protocole de notation des feuillus utilisé par le DSF

LES ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROJET

Aujourd'hui, il existe de nombreuses incertitudes sur les capacités des arbres à surmonter des changements climatiques abruptes. Face à ces modifications fortes du climat, les forestiers s'interrogent sur le devenir des forêts et la gestion d'une forêt productrice de biens et de services. Après une éclaircie dans un peuplement pour favoriser les arbres d'avenir, il faut pouvoir caractériser le degré de résistance, de résilience ou de dépérissement des arbres présents. Les forestiers ont besoin d'indicateurs pour évaluer la réactivité des essences aux aléas climatiques, d'outils pour la gestion du peuplement, et de connaissances en biologie de l'arbre pour mieux caractériser le dépérissement des arbres.

L'objectif de nos études est de proposer une méthode de diagnostic visuel sur le terrain permettant d'estimer la résilience des arbres. C'est-à-dire la capacité d'un arbre à absorber les perturbations après une période de changement et à revenir à son état initial ou passer à un autre état autre que la mort. Cette méthode aiderait à désigner les arbres d'avenir et à décider des traitements sylvicoles après une crise sanitaire ou de croissance.

Le diagnostic visuel de l'état de l'arbre est un outil aide précieux en voie de vulgarisation (Drénou, 2012). Une méthode basée sur la lecture de l'architecture de l'arbre a été développée pour le diagnostic architectural de l'arbre et a abouti à des clés de détermination ARCHI (Drénou et al. 2011 ; Drénou 2012). Ce type de démarche permet d'avoir une vision dynamique du développement de l'arbre qui aide à appréhender le devenir de l'arbre et à prendre des décisions de gestion du peuplement.

Pourquoi utiliser des critères architecturaux pour le diagnostic de l'état de l'arbre dans la forêt? L'analyse rétrospective de l'architecture est capable de détecter l'histoire de l'arbre et, ainsi, de reconstruire la dynamique de croissance des axes et du déploiement du houppier (Barthélémy & Caraglio, 2007). Cette méthode prend également en compte la stratégie d'occupation de l'espace par l'arbre et la compétition dans le peuplement. Des combinaisons de critères architecturaux renseignent, ainsi, sur la dynamique de restauration des axes après un événement climatique. Cette dynamique traduit la capacité de résilience de l'arbre. La méthode ARCHI (Drénou et al. 2011, Drénou 2012) est une méthode diagnostic ou index de vitalité de l'arbre efficace intégrant les différents mécanismes impliqués dans la réactivité des arbres en utilisant les connaissances acquises en architecture végétale et l'analyse rétrospective de la croissance et de la ramification (Barthélémy et Caraglio, 2007).

Les enjeux du projet sont : (1) proposer l'observation et l'analyse de la croissance, de la ramification et de l'architecture de l'arbre pour évaluer la capacité des espèces à se maintenir dans leur milieu ; (2) utiliser la prise en compte de la dynamique du développement dans le diagnostic forestier ; (3) simplifier les critères architecturaux identifiés pour qu'ils soient transmissibles et reproductibles ; (4) faciliter l'accès au diagnostic ontogénique de l'arbre qui permet de caractériser la dynamique de développement des arbres et qui pourrait être proposé comme base de référence dans les suivis pluri-annuels des peuplements forestiers.

1- Concepts et méthode : l'analyse architecturale

L'étude du développement des plantes par l'analyse architecturale (Hallé et Oldeman, 1970 ; Oldeman 1974 ; Edelin 1977 ; Barthélémy et al, 1989 ; Barthélémy et Caraglio 2007) permet de définir et identifier les caractéristiques du mode construction de chacune des espèces. Chaque espèce végétale possède un nombre fini de catégories d'axes. Ces catégories aux fonctions précises, constituent l'Unité Architecturale de l'espèce (Barthélémy et Caraglio, 2007). La séquence architecturale de développement résume les événements majeurs de la vie de la plante et l'organisation spatiale moyenne à chaque stade de développement. La structure de l'unité de croissance, unité de base prise en compte dans l'étude de l'architecture (portion de tige correspondant à une phase d'allongement ininterrompue), intègre l'état de développement de la plante, sa santé et les conditions du milieu : sa structure à un instant donné et à un endroit donné de l'architecture est donc le reflet de l'expression du fonctionnement méristématique (organogénèse et allongement).

Chaque stade de développement peut être associé à un taux de croissance annuelle estimée à partir de la structure des pousses annuelles mises en place à la périphérie de la cime de l'arbre. De manière générale, la structure se complexifie dans les premières phases de la vie de la plante puis se simplifie au cours du temps tandis que le diamètre primaire lors de la formation de la pousse augmente au cours du développement traduisant la maturation du méristème édificateur (protégé dans le bourgeon). Il est ainsi possible de définir et disposer d'une base de référence du développement optimal de l'espèce.

2- Les résultats

Le diagnostic ontogénétique est un outil qui sert à identifier le stade de développement de l'arbre.

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 chataignier) 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 montrent jusqu'à 4 UC.

- Le stade « adulte » correspond à un enrichissement de la ramification par la répétition 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 duplications 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. 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 » ou âgé 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 et par une répétition retardée plus ou moins abondante et qui n'arrive pas à compenser la mortalité en cime. Chez les conifères et espèces monoïques, la sexualité mâle tend à être prépondérante. Dans le houppier, les rameaux vigoureux sont épitones. Le houppier perd de sa compacité et se disloque.

L'outil se présente sous forme de fiche pédagogique avec schémas légendés des quatre principaux stades de développement décrit précédemment (voir Annexe). En comparant l'arbre observé aux schémas illustrant la séquence de développement de l'espèce, l'utilisateur déduit rapidement le stade de développement de l'arbre.

3- Conclusions et perspectives

Cet outil est abouti et cette approche est utilisée depuis longtemps par les plusieurs années par des gestionnaires d'arbres d'ornement. 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 rendre difficile la comparaison de les diagnostics de l'état des forêts différentes. 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. La séquence de développement pourrait être considérée comme base de référence du développement optimal de l'espèce. Les intérêts par rapport à l'arbre de référence sont (1) une approche dynamique et non statique et (2) une prise en compte de la part endogène du développement indépendante de l'environnement local.

LES CRITERES ARCHITECTURAUX

L'objectif est de lister les marqueurs architecturaux utilisables pour décrire l'état d'un arbre. L'hypothèse de travail est qu'une combinaison de marqueurs morphologiques permet de déterminer le niveau de sensibilité d'une espèce aux aléas climatiques (diagnostic de l'état de l'arbre).

1. Espèces étudiées

Les essences montrent des capacités de restauration différentes souvent liées à leur stratégie de développement. Le projet a permis de travailler sur la réactivité d'un ensemble d'essences de feuillus et de conifères exprimant une diversité de traits architecturaux. Le cèdre (*Cedrus atlantica*), le douglas (*Pseudotsuga menziesii*), des pins (*Pinus halepensis*, *Pinus sylvestris*), le sapin pectiné (*Abies alba*) ont un développement monopodial alors que le châtaignier (*Castanea sativa*) et les chênes dont le chêne pédonculé (*Quercus robur*) montrent un développement sympodial. La croissance du pin d'Alep et le chêne montre systématiquement du polycyclisme et non les autres essences. Les pins d'Alep et sylvestre, le hêtre (*Fagus sylvatica*), le châtaignier et le chêne subissent une métamorphose architecturale. Le cèdre et les pins ne produisent pas de rameaux épicorniques alors que les autres essences étudiées en possèdent mais ont des rameaux courts capables à devenir long en cas de stress et qui jouent un rôle dans la restauration des axes. 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 possède une grande variabilité de forme qui s'explique par une forte capacité à dupliquer un tronc à partir d'une branche et, ainsi, remplacer le tronc initial.

2. Méthodes

2.1. Analyse morphologique

Conformément à l'analyse architecturale (Barthélémy et Caraglio 2007) intégrant des concepts et des caractères morphologiques observés à différents niveaux d'organisation, cette étude est réalisée en observant des individus dans leur globalité dans des milieux variés. Dans notre cas, nous nous sommes focalisés sur des arbres montrant ou non des symptômes de

dépérissement. La structure de chaque individu est décrite et schématisée. La comparaison des différentes architectures permet de déduire des marqueurs morphologiques liés à la réactivité de l'arbre.

2.2 Analyse rétrospective de la croissance

Chez les espèces à croissance rythmique, comme la plupart des espèces des régions tempérées, l'observation de marqueurs morphologiques ou macro-anatomiques (entrenœuds courts, anneau de cicatrices de feuilles écailleuses, étages de branches, variation du diamètre de la moelle, présence de cernes de croissance ...Barthélémy et Caraglio 2007, Heuret et al. 2000, Taugourdeau et al. 2012) permet d'identifier et de localiser *a posteriori* les arrêts de croissance annuels des années passées sur les axes caulinaires. Cette référence temporelle permet d'estimer rétrospectivement l'âge d'un axe et ainsi de retracer l'évolution de la croissance et de la structure de l'arbre au cours du temps. L'analyse comparative d'individus dans le peuplement donne des informations sur l'impact des effets climatiques annuels sur la croissance et la ramification des axes.

3. Campagnes d'observation et protocole de mesures

L'acquisition de données complémentaires a été réalisée lors des campagnes d'observation listées ci-dessous.

3.1 Analyse rétrospective de la cime des arbres

Le protocole vise à identifier dans le peuplement des individus avec des cimes pyramidales, arrondies ou tabulaires (donc des stades ontogéniques différents) et de récolter, grâce à un grimpeur, une partie de la cime pour analyser sa croissance. Le développement de cette cime est quantifiée par une analyse rétrospective de la croissance. Les campagnes d'observation suivantes réalisées au cours du projet ont fait l'objet de ce type d'analyse. En parallèle et pour avoir un contrôle global de la croissance de la plante, une carotte de bois a été prélevée sur le tronc à 1,3m.

- Pin d'Alep à Fontanes (34) :

Placette du réseau systématique de suivi des dommages forestiers (DSF, contact : Pierre Girard, Inter région Sud-Est), commune de Fontanes. Peuplement âgé de 41-60 ans. 4 arbres

- Pin d'Alep à Gémenos (13) :

Placette suivie par l'URFM dans le cadre de la thèse de Marion Gillmann « Impact des communautés d'insectes sous corticaux sur la dynamique de dépérissement des forêts méditerranéennes. » (Encadrant Hendrik Davi). 20 arbres.

- Hêtre sur le versant Ouest de l'Aigoual (30) :

Placette du réseau RENECOFOR (ONF), HET 30, futaie régulière, âgée de 150 ans, à 1400 m dans la forêt de l'Aigoual. 10 arbres.

- Sapin pectiné sur le versant Nord du Mont Ventoux (84) :

Placette d'observation du dépérissement du sapin sur gradient altitudinal 1000 à 1300 m, DVX4 (INRA-URFM), Age des arbres 60-100 ans. 2 arbres.

- Sapin pectiné dans la forêt domaniale de Mirailles (11). 7 arbres.

3.2. Analyse morphologique des arbres

Cet ensemble de campagnes a fait l'objet d'analyse qualitative morphologique des arbres.

- Sapin pectiné dans le Vercors (26):

Placette RENECOFOR SP26 dans la Forêt Domaniale de Lente.

- Cèdre dans la forêt domaniale de Riasses (11)
- Cédres à Puechabon (34) :

Plantation comparative de 3 espèces de Cédres (INRA-URFM). Arbres âgés de 20 ans.

- Pin Sylvestre en peuplement naturel sur le versant Nord de la Sainte-Baume (83, dispositif IRSTEA)

4. Résultats : Des combinaisons de critères comme aide à la détermination du niveau de sensibilité d'une espèce aux aléas climatiques : diagnostic de l'état de l'arbre

Cet outil sert à identifier le degré de réactivité des arbres et donc la capacité de répondre aux perturbations abiotiques pour de jeunes arbres et des arbres adultes/matures. Les critères d'observation sont déclinés en 3 niveaux dans l'arbre : cime, houppier hors concurrence, et tronc & branches basses et correspondant à 3 échelles d'observation qui sont de la plus grande

à la plus petite : l'arbre entier, le système ramifié et la pousse annuelle. Une combinaison de critères permet d'estimer de degré de réactivité d'un arbre.

Les critères d'observation sont par exemple (voir tableau 1) :

- le contour du houppier, par sa régularité ou son irrégularité et par les modifications de sa compacité, reflète la taille des structures mises en place, la mortalité des axes et les processus de restauration exprimés (rameaux épicorniques par exemple);
- la mortalité des branches qui peu être suivie par l'expression de rameaux retardés ou épicorniques, essentiels dans un processus de restauration et de compensation des pertes de volume foliaire (Nicolini et al. 2001, 2003 ; Drénou et al. 2012);
- la structure de la pousse annuelle dont la structuration nous indique le niveau de vigueur de l'arbre. Par exemple, la pousse annuelle de châtaignier est composée de 5 zones montrant des productions axillaires différentes et ordonnées. Le nombre de zones et leur longueur diminuent progressivement au cours de l'ontogénie de l'arbre. La structure ultime de la pousse est un petit nombre d'entre-nœuds courts avec une perte de la capacité à ramifier et à fleurir ;
- l'expression des rameaux épicorniques qui indique une réaction de l'arbre.: Quand ils sont nombreux, grands bien hiérarchisés avec une direction de croissance verticale, ils permettent à l'arbre de poursuivre son développement.

Comment utiliser ces critères pour le diagnostic de l'état de l'arbre ? Lorsque l'arbre subit un dépérissement, il s'écarte de la norme et exprime des symptômes. Nous utilisons l'estimation de l'écart à la séquence de développement de référence de l'espèce comme indicateur d'un problème de développement de l'arbre puis nous apprécions sa réactivité. Par exemple pour un stade de développement de l'arbre donné, une dimension et une structure de pousses annuelles sont attendues et considérées comme normales. L'écart à la normalité, comme des pousses courtes, normalement rencontrées sur un arbre âgé, sur un jeune arbre, indiquera une sensibilité de l'arbre aux perturbations environnementales. Chez le hêtre adulte en forêt, des rameaux épicorniques de petite taille sont normalement observables à la base des branches maîtresses dans le houppier. Si les rameaux épicorniques sont présents sur l'ensemble de la branche et sur le tronc, cet envahissement du houppier apparaît anormal et donc signe d'une perturbation, indicateur de stress mais aussi indicateur de réactivité de l'arbre.

Les fiches techniques de notation proposées décrivent les critères à considérer en fonction de 3 niveaux dans l'arbre (cime, houppier hors concurrence et tronc et branches basses) et à 3 échelles d'observation (l'arbre entier, le système ramifié et la pousse annuelle). Pour chaque critère, des schémas simplifiés accompagnés de photographies représentent une gamme d'expression dudit critère. Il faut cocher la case correspondant à la structure observée. A terme, après la période de validation à partir de suivi de placettes, les combinaisons de critères seront ordonnées en fonction du degré de sensibilité afin de définir des trajectoires de développement.

Tableau 1 : Diversité des critères observés en fonction des niveaux dans l'arbre (cime, houppier hors concurrence et tronc et branches basses), de l'échelle d'observation (arbre entier, système ramifié et pousse annuelle). Certains critères sont spécifiques à l'espèce qui est notée.

	Stade	Arbre entier	Système ramifié	Pousse annuelle
Cime	jeune	Contour arrondi ou tabulaire		Pousse courte peu ramifiée. Rameaux immédiats (Cèdre) Rameaux interverticillaires (Sapin) Nb. de zones (Châtaignier). Polycyclisme (Pin, Chêne)
	adulte	Contour irrégulier ou tabulaire		Pousse courte peu ramifiée. Rameaux immédiats (Cèdre) Rameaux interverticillaires (Sapin) Nb. de zones (Châtaignier). Polycyclisme (Pin, Chêne) Sexualité abondante Sexualité mâle/femelle
Houppier hors concurrence	jeune	tassement des étages de branches Contour fragmenté	Mortalité Expression des rameaux épïcormiques (sauf Pins et Cèdre)	Arrêt temporaire du fonctionnement du bourgeon édificateur (sapin)
	adulte	Tassement des étages de branches Présence d'un 2 ^{ème} houppier Contour fragmenté Redressement de branches ou réitération totale (Pins)	Mortalité Expression des rameaux épïcormiques (sauf pins et cèdre) Degré de ramification petit Pas de réitération immédiate au niveau des branches	Sexualité mâle/femelle
Tronc et branches basses	jeune	Expression des rameaux épïcormiques (sauf Pins et Cèdre)	Mortalité Hypotonie/épitonie Persistance des branches basses vivantes (Cèdre)	
	adulte	Expression des rameaux épïcormiques (sauf Pins et Cèdre)	Mortalité Hypotonie/épitonie	Sexualité mâle/femelle

5. Résultats : nouvelles connaissances sur la signification de marqueurs morphologiques

Ce projet a permis plusieurs études réalisées dans le cadre de stages. Pour chacun des stages, les résultats principaux et les avancées sont résumées ci-dessous :

- **Expression du polycyclisme en fonction d'un stress hydrique chez des plants de Hêtre dans un dispositif comparatif en pépinière.** Une variabilité intra –spécifique du taux de polycyclisme et le diamètre de la pousse annuelle a été mise en évidence entre les trois populations issues de 3 placettes, N1, N2 et N4 (le long du gradient altitudinal sur la face Nord du Mont Ventoux). Le taux de polycyclisme serait sous la dépendance de facteurs internes (origine de la population) et externe (stress hydrique) et serait donc utilisable comme indicateur sur de jeunes arbres.

Chauvrat A. 2012. Réponse du hêtre (*Fagus sylvatica*) à la sécheresse : taux de polycyclisme. GLBP627, L3 parcours « Biologie Fonctionnelle des Plantes », UM2.

- **La rythmicité intra-annuelle de la croissance en longueur (polycyclisme) est-elle détectable dans le cerne annuel ?**

La variation cambiale inter et intra-annuelle en fonction du climat des conifères en contexte méditerranéen est un objet d'étude depuis maintenant une vingtaine d'années. Cependant les méthodes appliquées s'avèrent coûteuses en temps et ne permettent pas un couplage entre un niveau d'observation macro- et microscopique. Très peu d'études se sont intéressées à ce jour à la relation entre les croissances primaire et secondaire ainsi qu'à l'implication de facteurs environnementaux. Cette étude a permis de mettre en place une chaîne opératoire permettant un suivi continu multi-échelles des variations cambiales intra-annuelles afin de trouver des marqueurs morpho-anatomiques reflétant un couplage entre l'activité des deux méristèmes. Les résultats obtenus montrent que l'activité polycyclique est également influencée par certaines variables climatiques. Deux types de variations intra-annuelles anatomiques ont été mis en évidence : un rétrécissement du lumen et un épaississement de la paroi des trachéides dans le bois initial et un élargissement du diamètre radial du lumen dans le bois final. Les résultats concluants de l'approche novatrice permettent d'envisager à plus grande échelle une étude plus approfondie de ces mécanismes.

Arnaud C. 2012. Approche multi-échelle de la xylogénèse et relations avec l'architecture de l'arbre chez une espèce méditerranéenne le Pin brutia (*Pinus brutia* Ten, Pinaceae). Master 1. Ecosystemes, UM2.

Un article est en cours de rédaction : Arnaud C., Caraglio Y., Heinz C., Sabatier S. 2013. Mise en relation des cernes intra-annuels et du polycyclisme chez *Pinus brutia* Ten. à soumettre à AoBPlant.

- **L'activité cambiale montre-t-elle des variations intra-annuelles ?**

Un suivi hebdomadaire d'activité cambiale des Pins d'Alep et brutia a été réalisé de Mars 2012 à Mars 2013 à la Pépinière Départementales d'Aix les Milles (DDA) sur des arbres de 15 ans et a fait l'objet de 2 stages. La méthode de mesure suivie est celle de Rossi et al. (2006) à partir de prélèvements de micro-carottes de bois.

Le premier stage a permis de mettre au point le protocole de mesure sur les pins à partir des microcarottes prélevées.

Lehnebach R. Septembre 2012. Protocole de coupes histologiques en vue de l'étude de la réactivation cambiale chez *Pinus halepensis* Mill.

Le deuxième stage a permis les mesures et l'analyse. La phénologie des arbres est au cœur de nombreuses études visant à mieux comprendre la plasticité des écosystèmes forestiers. Ce sont essentiellement les processus de floraison et feuillaison qui sont abordés ; peu d'études le

font conjointement avec l'activité cambiale. Ainsi, un suivi de l'activité cambiale couplé à des observations de l'allongement du tronc afin de (i) étudier la dynamique intra-annuelle de l'activité cambiale pour (ii) observer la relation temporelle entre ces deux méristèmes et nous avons réalisé une cartographie (iii) mieux comprendre la réactivation cambiale en fonction de l'architecture. Les principaux résultats sont : (i) pas de fluctuation de l'activité cambiale décelable ; (ii) un décalage entre la fin de la croissance en hauteur et la fin de la croissance radiale et (iii) une hétérogénéité spatiale du signal de la réactivation cambiale dans l'arbre. Ces résultats encouragent la révision des protocoles classiquement utilisés.

Arnaud C. 2013. Réactivation cambiale et dynamique de la xylogénèse en fonction de l'architecture chez *Pinus brutia* Ten. (Pinaceae). Master 2. Ecosystèmes, UM2

- **Quelles sont les relations entre croissances primaire et secondaire chez les pins méditerranéens ?**

Les scénarios envisagés quant aux changements climatiques sont assez alarmants en zone méditerranéenne : il est en particulier attendu une augmentation de la longueur et de l'intensité de la sécheresse estivale. Il paraît donc indispensable d'estimer la capacité des essences en place à supporter de telles conditions. L'analyse architecturale et la description a posteriori de la croissance se prêtant bien à une telle démarche, l'étude de la variabilité architecturale de trois provenances de pins d'Alep et de brutia a été abordée en lien avec le climat. Une base de données architecturale a été constituée à cette fin. L'étude des critères architecturaux nous a montré l'intérêt de la moelle en tant que critère de datation, critère qui pourra s'avérer crucial pour de futures études. Nous avons aussi constaté que le pin de Brutie présente pour le tronc une architecture plus plastique que le pin d'Alep. Cette plasticité semble se traduire sur le comportement de ces deux espèces au climat, le pin d'Alep s'avérant plus sensible au climat. Un lien entre la croissance primaire et la production volumique a pu être mis en évidence, la première se révélant alors comme un bon indicateur de la vitalité de l'arbre.

Buissart F. 2012. Climat et variabilité interspécifique de la croissance annuelle chez les pins d'Alep (*Pinus halepensis* Mill. Subsp. *halepensis*) et de Calabre (*Pinus halepensis* Mill. Subsp. *brutia* (Ten.) E. Murray). Master 2 GEEFT, AgroParisTech, Montpellier.

Un article est en cours de rédaction : Buissart F., Caraglio Y., Sabatier S. Pith: a new parameter to monitor the past growth in *Pinus halepensis* Mill.

6. Conclusions et perspectives

Les fiches de notation des critères architecturaux sont utilisables 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. Cet outil demande des améliorations qui seront apportées suite à l'utilisation sur le terrain. L'utilisation de cet outil sur des placettes de suivi à moyen terme permettra (1) de simplifier et/ou de compléter les critères et leur iconographie, (2) de valider l'interprétation des critères et (3) d'associer aux combinaisons de critères un score de réactivité/sensibilité des essences aux perturbations du milieu.

Par ailleurs, pour le cèdre, des études complémentaires sont nécessaires pour établir une liste de marqueurs architecturaux indiquant la réactivité de l'espèce, particulièrement au stade de développement arbre adulte. La fiche n'a pas pu être réalisée. Pour le Pin sylvestre, des études ultérieures sont également nécessaires pour compléter la fiche réalisée.

Pour mieux comprendre la signification des critères nous avons besoin de connaissances sur la phénologie de la croissance. Par exemple chez le pin d'Alep, ces trois-quatre dernières années nous observons de plus en plus fréquemment deux floraisons successives au cours d'une année. Nous avons mis en place début 2013 un suivi de croissance pour 2 ans minimum sur un dispositif IRSTEA dans le cadre de la thèse de F. Buissart (IRSTEA-EMAX et CIRAD-AMAP). Les résultats permettront de préciser la phénologie du Pin d'Alep en lien avec l'organogénèse (induction florale) et les facteurs climatiques.

LA METHODE DES CLEFS ARCHI

La méthode des clefs ARCHI est un outil pour pronostiquer l'avenir à court terme des arbres dépérissants.

1- Le principe des clefs ARCHI

La méthode ARCHI intègre les dynamiques de résilience des arbres en ajoutant au relevé des symptômes de dépérissement habituels (déficit foliaire, mortalité...), un examen des gourmands. Le principe de la méthode ARCHI peut ainsi se résumer selon l'équation ci-dessous.

Symptômes de dégradation du houppier	+	Processus de restauration du houppier	=	Diagnostic ARCHI
--------------------------------------	---	---------------------------------------	---	------------------

La mise au point de la méthode a nécessité une méthodologie préalable sur la façon de prendre en compte l'ensemble des gourmands présents dans un arbre en situation post-traumatique. Comment analyser leur répartition spatiale, leur niveau de hiérarchie (dominant – dominé), leurs différences de croissance et leurs classes d'âges ? Une typologie des gourmands basée sur leur direction de croissance a été choisie.

Type de gourmand	Sémantique	Morphologie	Fonction
Orthotrope	Du grec : « orthos » : droit « tropos » : direction	-Direction de croissance verticale -Symétrie axiale	Réitérer l'architecture de jeunes arbres
Plagiotrope	Du grec : « plagios » : oblique « tropos » : direction	-Direction de croissance horizontale à oblique -Symétrie bilatérale	Réitérer l'architecture de branches ou de rameaux
Agéotrope	Du grec : « a » : sans « géo » : terre « tropos » : direction	-Pas de direction de croissance privilégiée -Absence de symétrie -Croissance réduite -Durée de vie limitée	Assurer la survie de l'axe porteur

Des clés de détermination guident l'observateur vers six sorties possibles.

Type ARCHI	Définition
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 à 1,3 m au dessus du collet

La méthode ARCHI se décline essence par essence et est aujourd'hui disponible pour six espèces: le chêne pédonculé, le chêne sessile, le chêne pubescent, le châtaignier, le Douglas et le sapin pectiné. D'autres espèces viendront progressivement s'ajouter au fur et à mesure de l'avancée des connaissances.

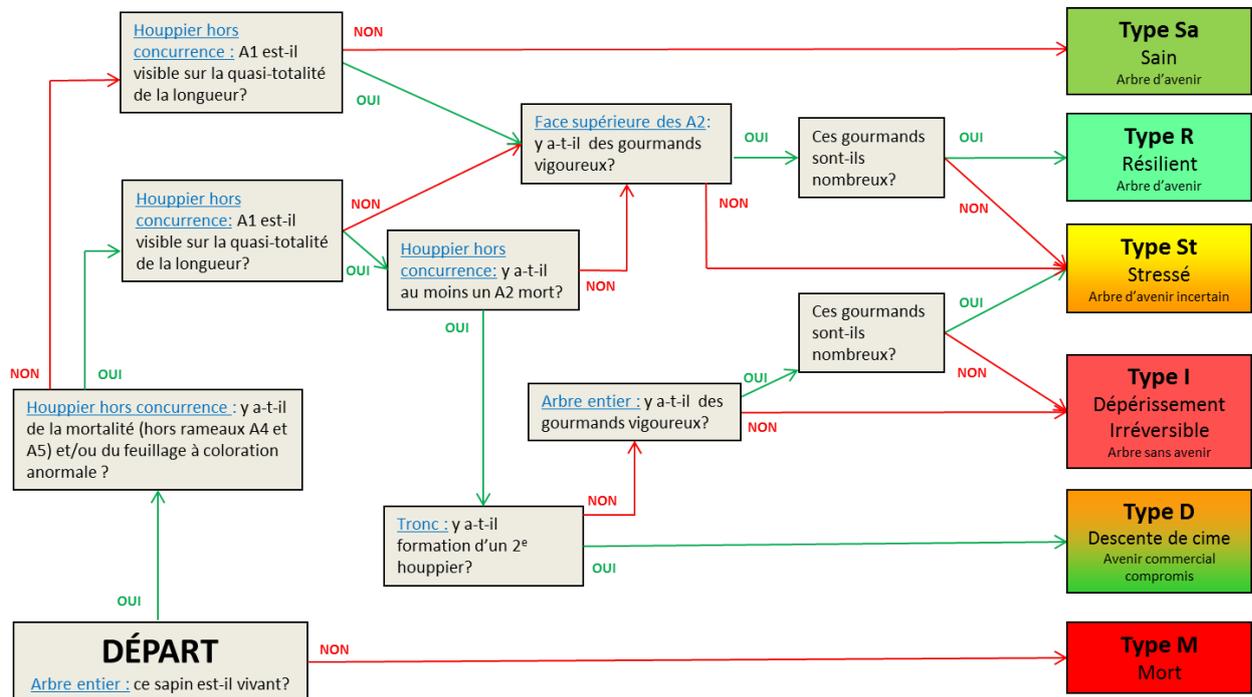
2- Exemples de deux clefs ARCHI : sapin pectiné et chênes

Pour chaque essence, un tableau synthétique et une clé de terrain sont proposés. Ceux du sapin pectiné et des chênes figurent ci-dessous.

2-1- Cas du sapin pectiné

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

deuxième houppier)

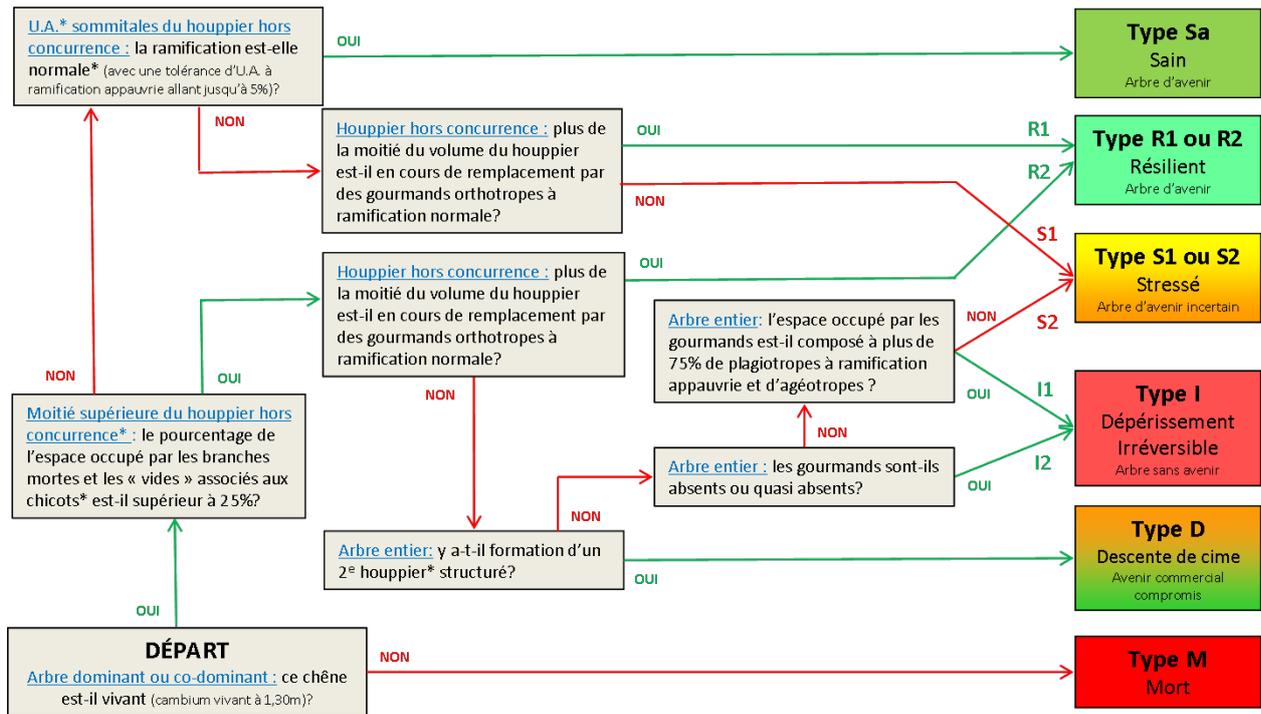


2-2- Cas des chênes (pédonculé, sessile et pubescent)

Symptômes de dégradation	Processus de restauration	Etat de l'arbre adulte & appellation (encodage)
AUCUN à LÉGERS Ramification en cime normale et % de l'espace occupé par les branches mortes et cassées inférieur à 25%	Observation inutile	Etat normal Arbre SAIN (Sa)
MODÉRÉS Ramification en cime appauvrie et % de l'espace occupé par les	LATENT Gourmands absents, rares ou récents	Ecart à la normale Arbre STRESSÉ (S1)

branches mortes et cassées inférieur à 25%	<p>ANTICIPÉ</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>Retour à la normale</p> <p>Arbre RÉSILIENT (R1)</p>
IMPORTANTES % de l'espace occupé par les branches mortes et cassées supérieur à 25%	<p>PRÉPONDÉRANT</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>Retour à la normale</p> <p>Arbre RÉSILIENT (R2)</p>
	<p>TRÈS FAIBLE en cime</p> <p>IMPORTANT en dessous</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>Retour à un état proche de la normale</p> <p>Arbre en DESCENTE de CIME (D)</p>
	<p>INCERTAIN</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</p>	<p>Ecart à la normale</p> <p>Arbre STRESSÉ (S2)</p>
	<p>AVORTÉ</p> <p>Gourmands quasi absents (type</p>	<p>Point de non-retour à la normale</p> <p>Arbre en dépérissement</p>

	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).	IRRÉVERSIBLE (I1 et I2)
--	--	--



3- Les innovations des clefs ARCHI

L'originalité de la méthode ARCHI est multiple.

- Elle traduit l'aspect non linéaire des dynamiques de réaction des arbres face au stress.
- Elle prend en compte les spécificités botaniques de chaque essence.
- Elle intègre l'observation des gourmands.
- 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 ARCHI.

- Elle privilégie l'analyse qualitative sur l'estimation quantitative des symptômes.
- Elle n'attribue pas de notes aux arbres, et ne permet donc pas de calculer des moyennes.

Les applications de la méthode ARCH peuvent s'envisager dans des domaines aussi variés que la biologie, la sylviculture, l'autécologie ou la génétique.

	<p>Biologie</p>	<p>-Reconsidérer les rôles des gourmands</p> <p>-Juger moins sévèrement les dépérissements</p>
	<p>Sylviculture</p>	<p>-Eclaircir au profit des arbres sains et résilients</p> <p>-Pronostiquer l'avenir des peuplements</p>
	<p>Autécologie</p>	<p>-Connaître les limites de chaque essence</p> <p>-Anticiper les effets du changement climatique</p>
	<p>Génétique</p>	<p>-Sélectionner les arbres les plus résistants</p> <p>-Etudier leur descendance</p>

4- Validation des clés ARCHI

Trois méthodes sont utilisées. La première, synchronique, consiste à étudier plusieurs dizaines d'individus de tous âges et dans différentes conditions d'environnement avant de pouvoir par comparaison établir les différentes dynamiques de réactions possibles après un stress. La deuxième, rétrospective, s'appuie sur la croissance radiale passée des arbres (étude des cernes par dendrochronologie). La troisième enfin, chronologique, nécessite le suivi individuel des arbres année après année.

Méthode de validation	Essences étudiées	Résultats, publications
-----------------------	-------------------	-------------------------

Méthode synchronique	Chêne pédonculé	Drénou, 1994
	Châtaignier	Pavie et <i>al.</i> , 2008
	Douglas	Genoyer, 1991
	Sapin pectiné	Taugourdeau, 2011
Dendrochronologie	Chênes pédonculés	Drénou et <i>al.</i> , 2012
Suivi chronologique	Douglas (CRPF Centre et Tarn)	Publication en projet
	Chênes pédonculés et sessiles (projet REINFFORCE)	Projet sur 10 ans initié en 2012

5- Les limites des clés ARCHI

Comme pour tout diagnostic, les observations demandées sont d'autant plus difficiles à réaliser que les forêts sont denses et hautes. Pour le sapin vient s'ajouter une contrainte supplémentaire : la présence du gui est parfois si importante qu'elle peut masquer une grande partie de l'architecture des houppiers, ce qui, dans certains cas, peut rendre la méthode ARCHI inutilisable.

Précisons que les clés de détermination des types ARCHI n'identifient pas les causes d'un dépérissement, ni expliquent les différences de comportement (résilience ou mortalité) des arbres au sein d'un même peuplement.

6- Témoignage de deux utilisateurs de la méthode ARCHI

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 assisté, 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.

Témoignage de **William MOORE** – Expert en arboriculture d'ornement – Directeur de l'Atelier de l'Arbre, Centre de formation pour les professionnels de l'arbre.

1- Les notions d'architecture végétale sont-elles connues par les professionnels de l'arbre d'ornement?

Parmi mes confrères arboristes ou experts, certainement. Au regard des erreurs de taille que je peux couramment entrevoir, il est évident que ce sujet nécessite encore et toujours d'être mis en avant.

2- Depuis quand utilisez-vous les concepts d'architecture végétale ? Lesquels en particulier ?

J'utilise l'outil "ARCHI" depuis 1988 environ. En particulier pour déterminer les stades de développement, comme la reconnaissance de la sénescence, mais aussi dans le diagnostic de l'état physiologique.

3- Quel a été l'apport de l'architecture végétale dans la pratique de votre métier ?

L'architecture est un outil incontournable qui permet d'apprécier le bilan énergétique d'un arbre. Pour nous c'est le point le plus important. L'ARCHI permet d'apprécier si oui ou non, la suppression de biomasse vivante peut-être envisagée lors d'une intervention de taille.

4- Sur quelles essences et sur quels types d'arbres vous servez-vous le plus de l'approche architecturale ?

Sur chaque arbre examiné nous utilisons l'ARCHI : pour définir le stade de développement ainsi que pour l'appréciation de l'état physiologique comme de la capacité de réaction.

5- L'architecture des arbres vous aide-t-elle à conseiller les gestionnaires d'arbres ? Avez-vous un exemple ?

Dans un plan de gestion de parc, nous pouvons étudier la pyramide des stades. Y a-t-il suffisamment de jeunes pour remplacer les vieux sujets par exemple. Elle nous aide

également pour suivre la reprise des arbres suite à la plantation ou pour suivre les arbres stressés soumis aux soins tels que le mulching. L'ARCHI permet ainsi d'apprécier l'efficacité des traitements.

6- Quels sont selon vous les avantages et les limites de l'architecture ?

Je pense que les réponses au-dessus expliquent les avantages. J'ai suivi des formations, mais il m'a fallu bien du temps pour maîtriser l'ARCHI, et il m'arrive encore d'hésiter. Donc la limitation en ce qui me concerne c'est qu'il faut beaucoup de temps, beaucoup de discussions et de lectures pour y arriver avec finesse. L'ARCHI est un outil parmi d'autres, il ne répond pas à tous les problèmes de diagnostic (pathologie, mécanique, risque, etc.), mais il reste cependant indispensable à notre pratique.

7- Comparaison des méthodes DEPEFEU et ARCHI

Le Département Santé des Forêts utilise un protocole de diagnostic visuel appelé DEPEFEU (Dépérissement Feuillus). Ce protocole est unique pour tous les feuillus, mais ne s'applique pas aux résineux. DEPEFEU est basé sur l'observation de critères élémentaires dans la moitié supérieure du houppier et sur l'attribution d'une note finale, globale à l'arbre (voir annexe 5). Cette note est comprise entre 0 (arbre sain) et 4 (arbre mort).

Des notations comparatives DEPEFEU et ARCHI ont été réalisées à plusieurs reprises sur le chêne pédonculé et dans différents sites : en 2010, sur la façade atlantique au cours du projet « Chênaie Atlantique » ; en 2013, dans le Nord Est, à Sarrebourg (57), ainsi que dans la région Ile de France (essai CRPF). Nous développerons les résultats issus de l'étude ayant porté sur le plus grand nombre de chênes à savoir le projet « Chênaies Atlantiques ».

Projets DEPEFEU/ARCHI	Nombre de chênes comparés	Responsable
Chênaies Atlantiques (72, 49, 79, 86, 36)	345	Jean Lemaire (IDF)
Sarrebourg (57)	232	Louis Michel Nageleisen (DSF)
Ménétréol sur Sauldre (18)	197	Jérôme Rosa (CRPF)

Au cours du projet « Chênaies Atlantiques », les arbres ont été observés à deux reprises à l'aide d'une paire de jumelles 12x50. Une première fois, en période feuillée (été 2009), selon le protocole DEPEFEU et après une formation préalable réalisée au DSF d'Orléans. Une deuxième fois, par des observateurs différents, en période défeuillée (mars et avril 2010) et selon la méthode ARCHI.

Les chênes considérés très peu dépérissants selon le protocole DEPEFEU (classe 1) sont également bien notés avec la méthode ARCHI (25% des classes 1 sont du type ARCHI sain et 45% du type Résilient). Au sein de la classe DEPEFEU 3 qualifiée de très dépérissante par le Département Santé des Forêts, la méthode ARCHI distingue effectivement des arbres en situation de dépérissement irréversible (type ARCHI I), mais aussi des sujets ayant réussi à reconstruire un houppier parfaitement sain en dessous des branches sommitales (type ARCHI Descente de cime). Entre les classes 1 et 3, l'hétérogénéité architecturale est forte : un chêne classé moyennement dépérissant avec le diagnostic DEPEFEU (classe 2) a, avec la méthode ARCHI, autant de chance d'être jugé comme un arbre d'avenir (50% des classes 2 sont des types ARCHI sain ou Résilient) que de risque de ne pas être sélectionné comme tel (l'autre moitié des classes 2 se compose de 4% de type ARCHI Descente de cime, de 21% de type ARCHI Irréversible et de 25% de type ARCHI Stressé).

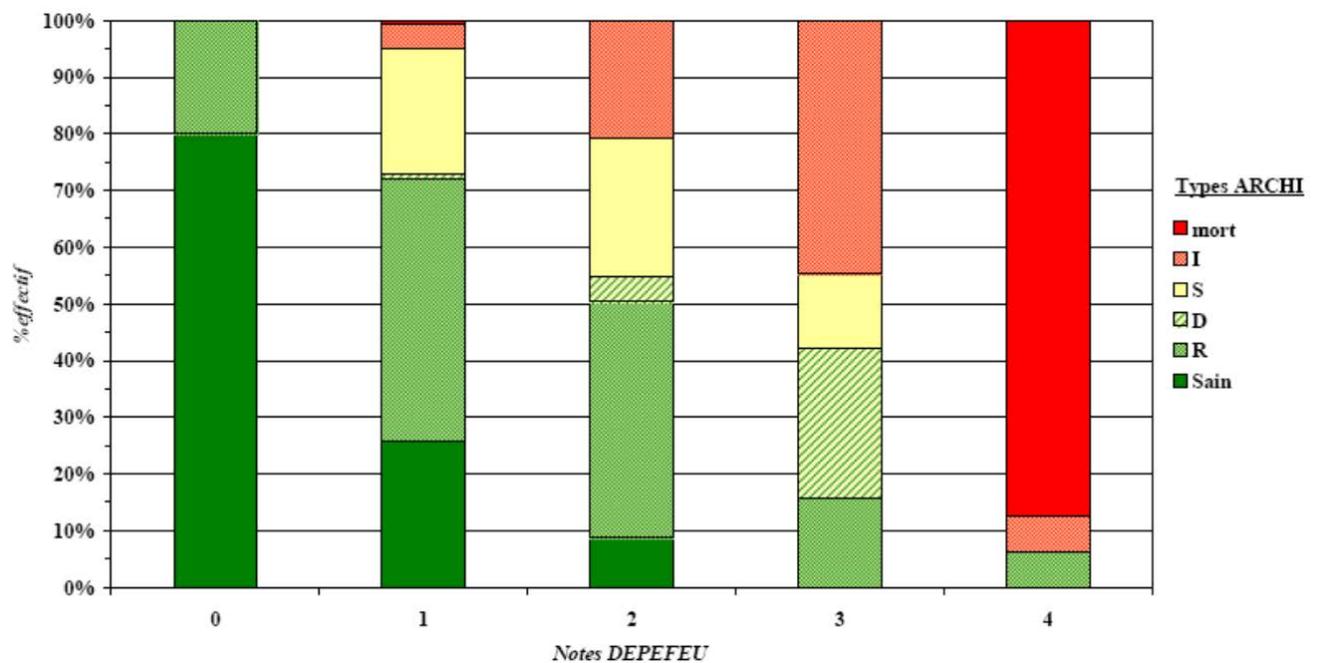


Figure 1 - Distribution des types ARCHI selon les notes DEPEFEU. Noter la très grande hétérogénéité de la note 2 du protocole DEPEFEU. R : Résilient, S : Stressé, D : Descente de cime, I : dépérissement Irréversible.

La méthode ARCHI ne permet pas de pronostiquer l'avenir de tous les types ARCHI. Ainsi, dans le cas du type Stressé, l'arbre peut se rétablir ou au contraire se dégrader. Cette classe à forte incertitude ne présente-t-elle pas le risque d'être surreprésentée ? Les résultats sont à cet

égard rassurants. La répartition des différents types ARCHI est en effet équilibrée. En revanche, au sujet des notes DEPEFEU, on note un net déséquilibre en faveur des notes 1 et 2 qui à elles seules représentent plus de 80% de l'effectif.

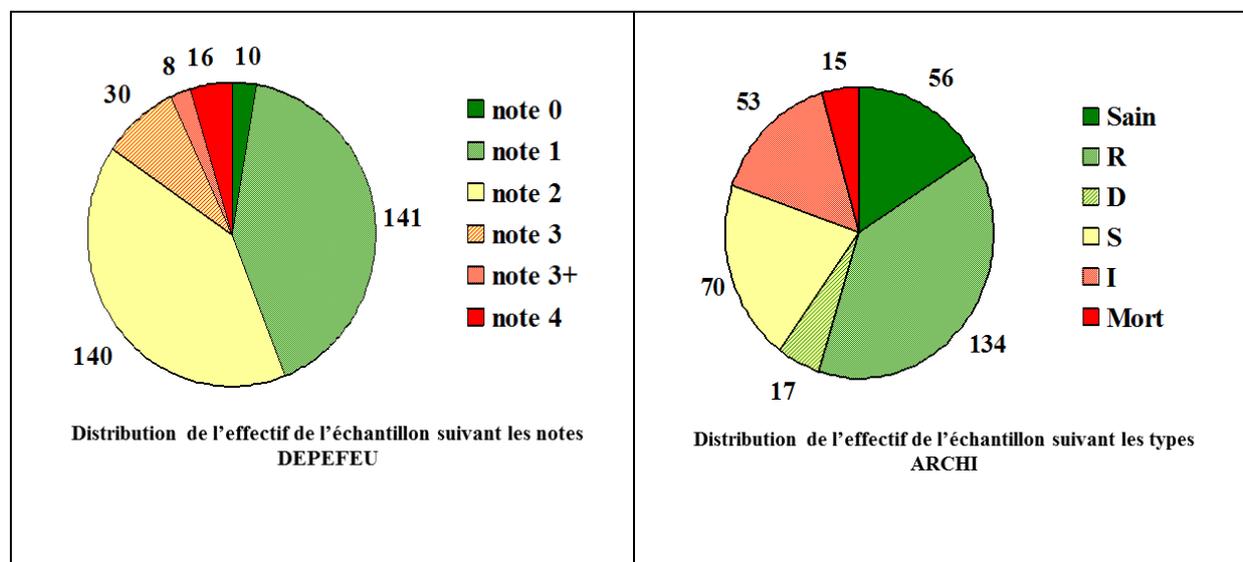


Figure 2 – Distribution des 345 chênes pédonculés de la figure 1 selon les types ARCHI et selon les notes DEPEFEU.

8- Les formations relatives aux clés ARCHI

8.1- En 2012

Lieu	Date	Intitulé	Public	Nombre de participants
St Afrique (12)	19 janvier	Présentation de la clé ARCHI Douglas	CRPF 12 et 81, ONF, experts, DDT, DSF	11
Versailles (78)	2 février	Savoir réaliser un diagnostic ARCHI	Paysagistes (Master 2 ENSAV)	25
Châteauneuf du Rhône (26)	12 au 14 mars	Savoir réaliser un diagnostic ARCHI	Professionnels de l'arbre d'ornement	25

Terrassa (Espagne)	28 et 29 mars	Savoir réaliser un diagnostic ARCHI	Professionnels de l'arbre d'ornement	30
Saliès (81)	11 mai	Sénescence et dépérissement des chênes	AG FOGEFOR, CRPF, propriétaires forestiers	65
St Croix de Volvestre (09)	3 décembre	Présentation de la clé ARCHI Sapin	CRPF, ONF, PNR, propriétaires forestiers	20

8.2- En 2013

Lieu	Date	Intitulé	Public	Nombre de participants
Lacabarède (81)	11 mars	Apprendre à se servir de la clé ARCHI Douglas	CRPF 81 et CRPF Languedoc-Roussillon	10
Lacabarède (81)	25 mars	Apprendre à se servir de la clé ARCHI Douglas	CRPF 12, 81 et CRPF Languedoc-Roussillon	4
Raslay (86)	18 avril	Apprendre à se servir de la clé ARCHI Chênes	DSF, IDF, CRPF, CETEF, propriétaire forestier	8
Clermont-Ferrand (63)	28 mai	Connaître les outils d'analyse architecturale des arbres	DSF	30
Villefort (11)	21 juin	Apprendre à se servir de la clé ARCHI Sapin	FOGEFOR, propriétaires forestiers	25
Saliès (81)	12 sept.	Apprendre à se servir de la clé ARCHI Douglas	Journée INTER-CETEF, propriétaires forestiers	25

8.3- En 2014

Il est prévu de proposer un stage de deux jours au catalogue des formations de l'IDF au cours du premier semestre 2014. Le contenu de ce stage prendra pour base le programme réalisé en 2013 pour le DSF en 2012 (annexe 3).

APPLICATION DIAGARCHI (DIAGNOSTIC ARCHITECTURAL SUR SUPPORT NOMADE)

Le produit est une application informatique sur Smartphone, en cours de développement, qui identifie l'état des arbres en forêt via le diagnostic architectural. Ce produit comprend des clés de détermination ARCHI de l'état de l'arbre (sain, résilient, stressé, dépérissement, descente de cime, mort) accompagnées d'aides pour la terminologie et critères observés sous forme de schémas et de photographies. Le système de questions et de choix utilisé est basé sur la notion d'arbre de décision.

Cet outil sert à (1) faciliter l'accès aux connaissances morphologiques pré-requises pour le diagnostic architectural, (2) donner les critères visuels facilement observables, (3) guider l'observateur dans sa démarche d'observation de l'arbre (niveaux et échelles d'observation dans l'arbre), (4) mémoriser l'historique des questions/réponses de chaque utilisateur et (5) à plus long terme obtenir des scores au niveau du peuplement via l'association d'outils d'analyse des arbres de décisions. Les enjeux de ce produit sont (1) de faciliter l'accès au diagnostic architectural de l'arbre qui permet de caractériser la dynamique de développement des arbres, utile comme base de référence dans les suivis pluri-annuels des peuplements forestiers et (2) d'aider à la gestion des données dans les dispositifs de suivi du dépérissement des peuplements.

Un prototype de ce produit a été réalisé pour le sapin sur une plate-forme de description et d'identification de spécimens (XPer2). Un prototype de l'application sur Smartphone a été réalisée sur le sapin pectiné et inclus la clé de détermination des types ARCHI du sapin. Cela se fait 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).

Pour finaliser et poursuivre ces travaux, nous avons soumis un projet à AAP pré-valorisation du département EFPA de l'INRA (15 Juin 2013) : «Une application pour le dépérissement des arbres : DIAGNOSTIC ARCHITECTURAL nomade » afin d'implémenter les différentes clés de détermination ARCHI.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au terme de ce projet, nous avons des outils qui intègrent la dynamique de développement de l'arbre et qui permettent d'évaluer la capacité d'un arbre à réagir à des perturbations environnementales. Nous proposons également la séquence de développement comme référence pour les notations comparatives. Aujourd'hui, certaines des approches évoquées dans cette étude sont utilisés depuis un petit moment d'autres sont plus récents et ont besoin d'être testées et validées. Pour comprendre la signification des critères d'observation sélectionnés dans le contexte des événements climatiques extrêmes, il faut une utilisation pratique des fiches proposées pour le suivi de parcelle sur des dispositifs de suivi déjà existants comme les dispositifs de l'INRA-URFM sur le Mont Ventoux. Un suivi dans le temps est indispensable sur une période de 5 ans en ajoutant à la notation classique, une notation architecturale. Cela est envisagé et à mettre en place sur les réseaux existants (placettes permanentes DSF, réseaux Renecofor ONF, Reinforce IDF, marteloscopes IDF).

Les placettes de suivi envisagées pour moment sont les suivantes :

- Sapin : Ventoux : placettes de suivi DVX (INRA-URFM), notations en Aout 2013. L'ONF est intéressé par un suivi ARCHI de la placette RENECOFOR de Quillan (SP11).
- Douglas : 30 placettes de 30 arbres chacune sont suivies avec ARCHI dans le Tarn et l'Aveyron par le CRPF depuis cette année et pour une période indéterminée.
- Chêne pédonculé : suivi ARCHI initié en 2012 sur 6 placettes de 200 arbres environ et pour une période de 10 ans (projet REINFFORCE).
- Hêtre : Aigoual RENECOFOR HET30 ; placette du réseau DSF en Lorraine en discussion.
- Cèdre : Ardèche IDF-CRPF, visite en Septembre 2013.
- Pin d'Alep et Pin sylvestre: Fontanes (Hérault, réseau DSF), Font-Blanche (plateforme expérimentale INRA, IRSTEA)

Les limites des outils sont (1) la visibilité du houppier en peuplements forestiers : ces outils demandent une bonne visibilité du houppier de l'arbre ; (2) malgré l'effort de simplification, les critères à observer restent encore complexes ; (3) le temps d'observation d'un arbre est plus long que lors de notations plus classiques. L'application nomade par la visualisation d'illustrations des critères et de l'enchaînement des questions/réponses facilitera l'accès aux critères d'observation et leur bonne interprétation. L'augmentation du temps d'observation peut être compensée par un gain de temps dans l'enregistrement des données et l'analyse des données via l'application nomade et les outils associés et surtout par la nature des interprétations qui en découleront.

FORMATIONS AUX OUTILS PROPOSES

Une intervention d'une journée a été effectuée lors des journées nationales du DSF organisées le 28 Mai à Clermont Ferrand (cf. annexe 2). Cette journée peut être considérée comme une pré-formation. Comme la formation est un prérequis pour l'utilisation des outils proposés, nous envisageons une formation auprès des techniciens de l'INRA lors de leur campagne de notation (par exemple, notation des sapins au Ventoux) et une formation au premier semestre 2014 ouverte aux notateurs et gestionnaires de l'arbre.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES

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.

Bouvier M., 2010. Mise en place d'un protocole de pronostic visuel de la capacité de réaction au dépérissement du chêne pédonculé. Mémoire ENITA Bordeaux, 90 p.

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

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

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

Drénou C. 2012. La méthode ARCHI. *FE*, 203, 29-31.

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.

Heuret P., Barthélémy D., Nicolini E., Atger C., 2000. Analyse des composantes de la croissance en hauteur et de la formation du tronc chez le Chêne sessile (*Quercus petraea*, Fagaceae) en sylviculture dynamique. *Canadian Journal of Botany*, 78, 361-373.

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.

Nicolini E., Caraglio Y., Pelissier R., Leroy C., Roggy J.C., 2003- Epicormic branches, a growth indicator for a tropical forest tree, *Dicorynia guianensis* Amshoff (Caesalpiniciaceae). *Annals of Botany*, vol. 92, n°1: 97-105.

Nicolini, E., Chanson, B., Bonne, F., 2001. Stem growth and epicormic branch formation in understory beech trees (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Botany*, 87 (6) : 737-750.

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.

Rossi, S., Deslauriers A., Anfodillo T., Morin H., Saracino A., Motta R., and Borghetti M., 2006. Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist* 170: 301–310.

Taugourdeau, O., Dauzat, J., Griffon, S., Sabatier, S., Caraglio, Y. & Barthélémy, D. 2012. Retrospective analysis of tree architecture in silver fir (*Abies alba* Mill.): ontogenetic trends and responses to environmental variability. *Annals of Forest Science*, **69**(6), 713-721.

LES PUBLICATIONS RELATIVES AUX CLES ARCHI

Avant le RMT (avant 2013)

DRENOU, C. 1994 - Approche architecturale de la sénescence des arbres, le cas de quelques angiospermes tempérées et tropicales. Thèse de doctorat, Univ. de Montpellier II, 263 p.

DRENOU, C. 1995 - Descentes de cime, des données nouvelles - *Forêt entreprise* 102 : 42-47.

DRENOU, C. 2000 – Estimer l'état général d'un arbre par la méthode architecturale. *Forêt entreprise*. 134 : 36-40.

DRENOU, C. 2003 – Stima delle condizioni di un albero, l'analisi della sua struttura architettonica – *Sherwood* 90 : 29-33.

Dujesiefken D., DRENOU C., Oven P., Stobbe H. 2005 – Arboricultural practices. pp. 419-441. *In* Konijnendijk C., Nilsson K., Randrup T.B., Schipperijn J. Eds. « Urban Forests and Trees », Springer, 520 p.

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

DRENOU, C. 2009 – Face aux arbres. Apprendre à les observer pour les comprendre. Ulmer édit., Paris, 156 p. A reçu le Prix Spécial du Jury P. J. Redouté en 2010.

Bouvier, M. 2010 - Mise en place d'un protocole de pronostic visuel de la capacité de réaction au dépérissement du chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) - Mémoire de fin d'études, énéa de Bordeaux, 40 p. + annexes.

DRENOU, C. 2010 – Restoring the past : can old trees in parks be rejuvenated? I congreso hispanoamericano de arboricultura – XIII congreso nacional de arboricultura. “Restaurando el pasado, planificando el futuro”. Toledo, del 23 al 27 abril de 2010. Asociacion Espanola de Arboricultura ed. : 9-14.

DRENOU, C., Bouvier, M., Lemaire, J. 2011 – La méthode de diagnostic ARCHI. Application aux chênes pédonculés dépérissants. *Forêt entreprise*. 200 : 4-15.

DRENOU, C., Bouvier, M., Lemaire, J. 2012 –Rôles des gourmands dans la résilience des chênes pédonculés dépérissants. *Forêt Wallonne*. 116 : 42-55

DRENOU, C. 2012 – La méthode ARCHI. *Forêt entreprise*. 203 : 29-31.

Genoyer, P. 1991 – Quelques éléments du développement architectural du douglas, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Rapport présenté au Laboratoire de modélisation du Centre de Coopération Internationale en recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Laboratoire de Botanique, université de Lontpellier II, Montpellier.

Giraud, F. 2012 - Suivi du dépérissement du sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans les Pyrénées : croisement de deux méthodes, l'architecture et la télédétection, à deux échelles spatiales différentes. Mémoire de fin d'études, ENSSA, Université de Bordeaux 1, 34 p. + Annexes.

Gravier, H. 2012 - étude du dépérissement des sapinières du Livradois Forez. Mémoire de fin d'études, ENSSA de Bordeaux Aquitaine, 34 p. + Annexes.

Millet J., (2012) L'architecture des arbres des régions tempérées : son histoire, ses concepts, ses usages. Éditions Multimondes, 397 p.

Taugourdeau O., (2011) Le sapin pectiné (*Abies alba* Mill., Pinaceae) en contexte méditerranéen : développement architectural et plasticité phénotypique. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, 217 p.

Après le RMT

DRENOU, C. 2013 – La méthode ARCHI. *Silva Belgica*.120- 1/2013 : 10-12.

DRENOU, C. 2013 – Diagnostic sanitaire des arbres : la méthode ARCHI. *La Forêt Privée*. 331 : 64-68.

DRENOU, C., GIRAUD, F., GRAVIER, H., SABATIER, S., CARAGLIO, Y. 2013- Le diagnostic architectural : un outil d'évaluation des sapinières dépérissantes. *Forêt Méditerranéenne*. T. XXXIV, n°2 : 87-98.

Annexe 1. Le comité de suivi

Comité de suivi : Compte rendu de la Réunion du 27/06/2012 qui s'est déroulée sur le Mont ventoux.

Participants : Louis-Michel Nageleisen (DSF, Nancy), Jacques Becquey (IDF, Lyon), Pierre Girard (DSF, Avignon) ; Hendrik Davi (INRA-URFM, Avignon) ; Nicolas Mariotte (INRA-URFM, Avignon) ; Christophe Drenou (IDF, Toulouse) ; Michael Guérout (INRA-AMAP, Montpellier) ; Yves Caraglio (CIRAD-AMAP, Montpellier) et Sylvie Sabatier (CIRAD-AMAP, Montpellier).

Ordre du jour : Objectifs généraux du projet RMT-Aforce Indicateurs architecturaux : Mise au point de fiches techniques de notation de l'état de l'arbre dans le peuplement pour des gestionnaires de l'arbre. Ces fiches devraient comprendre des connaissances sur la croissance et l'architecture, une notation de l'arbre via quelques critères architecturaux simples et une clé pour déterminer si l'arbre est sain, résilient ou dépérissant.

Objectifs :

- Présentation de deux approches complémentaires : l'analyse architecturale (AMAP) et l'approche diagnostic ARCHI (IDF).
- Proposition de fiche de protocole de notation
- Premier test sur une parcelle de sapins (DRIADE-URFM, DVX4)
- Discussion pour ajustement de la fiche de notation

Les points de discussion abordés au pied des sapins :

- Pourquoi dans un peuplement certains arbres sont plus attractifs pour les scolytes que d'autres ? Besoin de synthèse des relations entre phénologie, croissance et physiologie de l'arbre ; est-ce que l'architecture peut apporter quelque chose pour les analyses de l'impact de facteurs biotiques sur la croissance et productivité ?
- Actuellement thèse en cours à l'URFM pour suivre en direct l'attaque des scolytes sur le pin d'Alep

Retour sur le prototype de fiche appliqué au sapin pectiné :

- De manière générale, les critères proposés sont compliqués à noter :

Les conseils des experts : rajouter un schéma de l'arbre pour indiquer la position d'observation dans l'arbre (sommet de la cime, houppier, tronc, branche basse ...) ; rajouter une notation des « gourmands » sur les branches (versus restructuration positive des branches

); pour le critère « structure des pousses annuelles » problème de visibilité du sommet de l'arbre, proposer l'observation sur une branche haute ;

- Rajouter la durée de vie des feuilles dans la fiche de notation
- Dans les notations DSF, un des critères mesurés est « visibilité du tronc de l'arbre ».

En architecture des arbres, il pourrait être traduit par une description de la structure des branches (ordre de ramification maximale, réitération séquentielle ...)

Discussion en salle suite à la présentation de Christophe Drénou sur les résultats du diagnostic ARCHI (Sapin, Douglas et Chêne) :

- Importance de fiche avec la description et la prédiction : arbre sain, résilient ou dépérissant ; rajouter un score au protocole de notation pour un résultat prédictif. Signification physiologique d'un état de l'arbre ;
- La notation concerne le « houppier notable » c'est-à-dire hors concurrence entre voisins
- Importance de synthétiser les connaissances et la définition des critères dans les fiches
- Proposition d'identification assistée sur tablette pour la notation des arbres ;
- Différence entre un arbre sénescant et dépérissant : un arbre dépérissant montre une rupture dans sa trajectoire de développement ;
- Rajouter la notion d'âge de l'arbre via le stade de développement de l'arbre ;
- Grille d'analyse pour un suivi : notation standard (critères communs à toutes les espèces) + critères spécifiques à chaque espèce ;
- Facteur biotique : facteur déclenchant ? facteur modulateur? Arbres en état de stress, typologie des arbres susceptibles d'être préférentiellement attaqués ;
- Placettes de suivi pour validation des fiches : validation sur dispositifs existants sur une période de 5 ans à partir de 2013. Notation classique et notation architecturale. Dispositifs possibles : les placettes REINFORCE (IDF), les marteloscopes (IDF), le réseau RENECOFOR et le réseau de placettes DSF installées depuis 1989. Il y a également la forêt de Sarrebourg (dispositif DRYADE, DSF-INRA) :

Prévisions pour restitution de l'état d'avancement :

- Article dans Forêt Entreprise
- Février 2013, formation

- Réunion Nationale du DSF à Bordeaux : 3ème semaine de Janvier 2013

Annexe 2 : sommaire de la formation organisée pour le DSF le 28 mai 2013 à Clermont Ferrand

8h30-8h45 Présentation du Projet RMT-Aforce « Indicateurs architecturaux de la réponse des arbres aux modifications climatiques ».

8h45-10h15 : Connaissances en architecture végétale (Intervenant : Yves Caraglio)

10h15-10h45 : Séquence de développement des arbres (Intervenant : Sylvie Sabatier)

10h45-11h00 : Critères à observer pour le diagnostic de l'état de l'arbre (Intervenant : Sylvie Sabatier)

11h00-11h15 : PAUSE

11h15-11h45 : Les fiches de notation proposées (Intervenant : Sylvie Sabatier)

11h45-12h30 : Diagnostic ARCHI du dépérissement des arbres (Intervenant : Christophe Drénou)

12h30-13h00 : Applications informatiques (Xper et ADDA) et travaux dirigés (Intervenant : Yves Caraglio).

13 h 00 : REPAS

Après-midi : terrain, utilisation des outils proposés sur le sapin, le chêne et le Douglas

Intervenants:

Sylvie SABATIER & Yves CARAGLIO (Cirad)

Christophe DRENOU (IDF)

Annexe 3 : le protocole de notation des feuillus utilisé par le DSF (DEPEFEU)

(selon : Nageleisen L.M. (2012) Méthode d'évaluation de l'aspect des houppiers des arbres feuillus (protocole DEPEFEU). Département de la santé des forêts, document interne, 17 p.)

L'observateur doit noter de 0 à 4 les neuf critères présentés dans le tableau 1, 0 étant la note la plus basse attribuée à l'arbre sain. Le passage de la notation multicritère à l'attribution d'une note globale unique par arbre se fait :

- soit à dire d'expert en définissant des catégories, de l'arbre sain à l'arbre mort (tab. 2),
- soit en utilisant des équations mathématiques (tab. 3).

TRANSPARENCE	Apprécier la transparence globale mais aussi la présence	FENETRE	TF
--------------	--	---------	----

	de fenêtre (trouée dans le houppier laissant voir une tache de ciel) ou d'échancrure dans le pourtour du houppier	ECHANCRURE	TE
		TRANSPARENCE GLOBALE	TG
MORTALITE ORGANES PERENNES	Distinguer les rameaux ($\varnothing < 3$ cm) des branches ($\varnothing < 3$ cm) et apprécier l'importance de cette mortalité par rapport à l'ensemble du houppier observé	RAMEAUX	MR
		BRANCHES	MB
		MORTALITE GLOBALE	MG
REPARTITION MASSE FOLIAIRE	Estimer la perte globale de ramification fine dans le houppier notable ainsi que la présence de rameaux en fouet ou de feuilles agglomérées en paquet dans la périphérie supérieure du houppier	FOUETS	F
		PAQUETS	P
		Perte Rameaux fins	PR

Tableau 1 : Critères symptomatologiques à observer dans la partie supérieure du houppier des arbres

<p>0 : absence de symptôme ; ramifications fines très abondantes ; houppier à l'état feuillé opaque ne laissant quasiment pas voir le ciel à travers</p> <p>1 : rameaux fins desséchés dans la périphérie du houppier et/ou transparence légère à modérée liée à une perte de ramifications fines légère et/ou présence de fenêtres disjointes et/ou rameaux en fouet. Squelette de l'arbre invisible à l'état feuillé</p> <p>2 : branches desséchées dans la moitié supérieure du houppier mais moins de 50 % et/ou transparence moyenne à forte liée à une perte assez forte de ramifications fines (<50 %) et/ou échancrures nettes dans le houppier et/ou feuilles apparaissant réparties en paquet - Visualisation partielle du squelette de l'arbre à l'état feuillé</p> <p>3 : branches mortes composant plus de 50 % du houppier et/ou disparition de plus de 50% de la ramification - Visualisation totale du squelette de l'arbre</p> <p>3+ : branches mortes composant plus de 75 % du houppier et/ou disparition de plus de 75% de la ramification - Visualisation totale du squelette de l'arbre</p> <p>4 : houppier mort ; arbre mort ou moribond</p>
--

Tableau 2 : Classes globales de notation du protocole DEPEFEU.

Indice de Transparence	$IT(\text{été}) = (TF + 2*TE)/6 + TG/2$ $IT(\text{hiver})=(TF+2*TE)/3$
Indice de Mortalité	$IM = (MR + 2*MB)/6 + MG/2$
Indice de Masse foliaire	$IF = (FF + 2*FP)/6 + PR/2$
Indice de dépérissement	$DEPEFEU = [((4 - IM)/4) * ((IT + IF) / 2)] + IM$

Tableau 3 : Calcul d'un indice de dépérissement à partir des critères symptomatologiques élémentaires du tableau 1.