

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/331591354>

Comprendre et agir contre le dépérissement du cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica*) en Ardèche

Technical Report · June 2018

DOI: 10.13140/RG.2.2.27103.51368

CITATIONS

0

READS

560

2 authors:



Jean Lemaire

Centre National de la Propriété Forestière

31 PUBLICATIONS 42 CITATIONS

SEE PROFILE



Sabine Girard

Centre National de la Propriété Forestière

28 PUBLICATIONS 35 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



climate changes, decline modelisation in temperate forest [View project](#)



Chestnut imbreeding [View project](#)

Rapport final de la phase 2 de l'action :

Comprendre et agir contre le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Ardèche verte

Action soutenue financièrement par :

-la Région Auvergne-Rhône-Alpes



-la Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la région Auvergne-Rhône-Alpes



PRÉFET DE LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Action coordonnée par :

-l'Institut pour le Développement Forestier



En partenariat avec :

-le CRPF Auvergne Rhône Alpes,



-l'INRA (Unité Mixte de Recherche PIAF, Clermont Ferrand)



-l'ONF



Rédacteurs du rapport :

S. Girard, J. Lemaire, Th. Améglio

Ont participé à ce travail :

Au CNPF-IDF :

François Charnet

Sabine Girard

Jean Lemaire

Maxence L'Hullier

Christophe Vidal

Au CRPF Auvergne Rhône Alpes :

Jacques Degenève

Bruno Pasturel

Norbert Riocreux

René Sabatier

A l'INRA :

Thierry Améglio

Guillaume Charrier

Christophe Serre

A l'ONF :

Isabelle Gillibert

Jacques Sozet

Merci aux propriétaires qui ont mis à disposition leur parcelle pour les expérimentations : Mme Gillibert, Mrs Bechetoille et Robin et la commune d'Annonay (07).

Merci également à la commune de St Clair (07) qui a accueilli les réunions du comité de pilotage de l'action et la journée de restitution du 27 juin 2018.

Comprendre et agir contre le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Ardèche verte

Phase 2

Résumé :

Depuis plusieurs années, des anomalies de croissance (dessèchement de cimes ou d'un segment du tronc, port en boule...) voire des mortalités de cèdres de l'Atlas sont constatés en Ardèche, en particulier dans la moitié nord du département. La première phase de l'étude (2013-15) avait permis de cartographier et quantifier les dégâts sur l'ensemble du département et de formuler les premières hypothèses quant aux facteurs explicatifs.

Il avait alors été montré que ces anomalies n'étaient pas liées à la nature du substrat géologique (calcaires, schistes ou granites), ni au déficit hydrique des dernières années, que leur présence était en revanche corrélée aux températures froides de la période hivernale.

La seconde phase du projet a donc exploré plus avant les liens entre le froid et les anomalies de croissance observées. L'évolution du niveau d'endurcissement au froid au cours de deux hivers a ainsi été enregistrée. Ce suivi a montré qu'en fin d'hiver (mars) des températures impactant fortement les tissus foliaires voire les rameaux pouvaient survenir sur le territoire étudié. Ainsi en mars 64, 70, 71, 73, 2005, 06 et 10 des températures inférieures à -12°C sous abri ont été enregistrées dans le secteur le plus vulnérable du département.

Le suivi a également mis en évidence des variations rapides du niveau de résistance au gel en fonction de la température de l'air ; ainsi, en mars 2018, après un mois de février froid, le niveau d'endurcissement était plus fort qu'en janvier de la même année tandis qu'un mois après, ce niveau était très bas.

L'abattage d'arbres présentant des décollements d'écorce sur le tronc, a permis de repérer des cernes entièrement noirs correspondant à l'année 2005. Les dégâts des arbres ayant une cime sèche ou un port en caniche concernent quant à eux la pousse mise en place en 2010. Dans les territoires les plus exposés, des températures exceptionnellement froides ont été enregistrées en mars de ces deux années : -16,2°C en 2005 et -13,5°C en 2010 sous abri.

Sur deux parcelles, une analyse spatiale de l'intensité et du type d'anomalies de croissance a pu être réalisée, ce qui a permis de mettre en évidence une moindre présence des phénomènes à proximité des bordures exposées au nord tandis que les expositions chaudes sont plus touchées. Cette situation évoque la possibilité que ce soit la succession d'une température très froide (en général en fin de nuit) et le réchauffement rapide en journée lorsque l'arbre se trouve au soleil qui entraîne une nécrose cambiale provoquant les dégâts observés.

La seconde phase du projet a permis de montrer que les anomalies de croissance observées n'étaient pas liées à une carence minérale en Bore, contrairement à ce qui avait été observé dans certaines plantations auvergnates.

Outre les impacts sur la qualité des grumes des arbres présentant des décollements d'écorces et des descentes de cimes, l'étude a permis d'évaluer à 1 cm/an la croissance en circonférence des peuplements, valeur très faible qui a été surtout attribuée à leur surdensité (25m²/ha de surface terrière) sans qu'il ait été possible d'évaluer précisément l'impact des anomalies de croissance.

Suite aux différents éléments recueillis, une nouvelle carte de vigilance pour le cèdre a été établie et un certain nombre de préconisations sont formulées pour les futures plantations de cèdre dans le département.

Par ailleurs, deux essais ont été installés dans des peuplements en place présentant des anomalies de croissance pour pouvoir suivre les effets d'opérations de dépressage sur leur état sanitaire à court et moyen termes.

Les résultats obtenus ont été présentés lors d'une journée de restitution qui a rassemblé une quarantaine personnes (gestionnaires privés et publics, conseillers, propriétaires) venues de l'Ardèche mais aussi des départements limitrophes (26, 42, 43, 63, 01, 03). Ils feront par ailleurs l'objet d'articles dans des revues techniques (rédaction en cours).

Bien qu'issues d'une problématique soulevée par les acteurs ardéchois du monde forestier, les précisions que ce travail a apporté sur l'autécologie du cèdre de l'Atlas pourront être valorisées au-delà du département de l'Ardèche et en particulier dans d'autres départements de la région Auvergne Rhône Alpes où des phénomènes similaires sont désormais repérés. Plus largement encore, il convient d'intégrer ses éléments dans une réflexion sur le développement de cette espèce sur le territoire français dans un contexte de changement climatique.

Comprendre et agir contre le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Ardèche verte

Phase 2

Sommaire

Les symptômes observés -----	9
Des anomalies de croissance déjà rapportées par le passé -----	11
Localisation des cédraies en Ardèche-----	20
Etat sanitaire des cédraies ardéchoises -----	21
Corrélations entre état sanitaire des cédraies et facteurs du milieu -----	23
Le cèdre et le froid -----	25
Vulnérabilité au gel du cèdre dans le bassin d'Annonay-----	30
Datation des anomalies de croissance -----	34
Spatialisation des dégâts dans deux parcelles -----	40
Suivis du débourrement 2018 -----	51
Des symptômes liés à une carence en bore ? -----	55
Suivi de l'impact d'un dépressage en régénération naturelle-----	60
Différentes modalités de dépressage en plantation -----	66
Nouvelle carte de vigilance pour le cèdre -----	69
Les facteurs abiotiques liés aux anomalies de croissance du cèdre observées en Ardèche ces dernières années : synthèse-----	72
Impact des anomalies sur la croissance des cèdres en Ardèche -----	78
Bilan et Conclusion -----	85
Bibliographie -----	87

Comprendre et agir contre le dépérissement du cèdre de l'Atlas en Ardèche verte

Phase 2

Dans un contexte de changement climatique avéré (+1,1 °C depuis la fin des années 80, Gibbelin et coll., 2014), le cèdre est une essence sur laquelle se porte de nombreux espoirs, en Ardèche comme sur le territoire français dans son ensemble. Réputé résistant à la chaleur et la sécheresse, il est aujourd'hui souvent préconisé sur des stations forestières sèches de basse altitude ou pour remplacer des peuplements d'épicéas, de sapins ou de douglas dépérissants suite aux sécheresses successives des années 2000. Outre son adaptation à des conditions de vie plus sèches, le cèdre, résineux apprécié du point de vue paysager, peut avoir une productivité intéressante (Courbet et coll., 2012) et son bois, de qualité et durable, peut être valorisé pour de nombreux usages. Déjà largement présent dans le quart sud-est de la France depuis le XIX^{ème} siècle, son implantation pourrait concerner à l'avenir une part grandissante du territoire français.

En Ardèche verte et en particulier dans le bassin annonéen, l'espèce est présente depuis la fin du 19^{ème} siècle (autour du barrage du Ternay en particulier). Depuis les années 80, elle est assez largement utilisée en reboisement que ce soit après tempête ou après incendies. Alors que son adaptation aux conditions locales semblait acquise, l'apparition d'anomalies de croissance (dessèchement de cime, port buissonnant ou « en caniche ») voire de mortalité ces dernières années inquiète les forestiers locaux. Ceux-ci s'interrogent sur l'ampleur du phénomène, sur ses conséquences quantitatives et qualitatives, sur les moyens techniques à leur disposition pour l'atténuer. Ils sont particulièrement démunis lorsqu'il s'agit de conseiller un propriétaire privé ou public qui souhaite réaliser une plantation sur le territoire : Doit-on encore conseiller le cèdre ? Où peut-il être installé ? Quelle autre espèce proposer ?

Portées initialement par le Pays de l'Ardèche Verte, ces préoccupations ont été relayées auprès d'organismes de R&D qui ont proposé une série d'actions pour essayer de comprendre les anomalies de croissance observées et proposer des recommandations à caractère opérationnel. Une première série d'actions a été menée entre 2013 et 2015 grâce au soutien financier de la DRAAF et du Conseil régional de la région Rhône-Alpes (phase 1), une seconde entre 2016 et 2018 avec l'aide financière de la DRAAF et du Conseil régional de la nouvelle région Auvergne-Rhône-Alpes (phase 2).

Le présent rapport rappelle les principaux éléments obtenus lors de la phase 2 et détaille les actions et les résultats de la seconde phase (2016/18) ; celle-ci est organisée en quatre volets visant à :

- **Approfondir la compréhension** les processus et facteurs intervenants dans les anomalies de croissance observées (volet 1). Il s'agissait notamment d'examiner par différentes méthodes, le lien entre ces phénomènes et le froid, ce facteur climatique ayant été mis en cause lors des travaux précédents sans toutefois avoir pu documenter ses modalités d'action (épisodes de gel, cinétique d'endurcissement au froid, risque gélif des feuilles et des rameaux...). Il s'agissait également de déterminer si des carences minérales, notamment en Bore, pouvaient être impliquées, hypothèse qui n'avait pas été examinée précédemment.

- **Rechercher des solutions opérationnelles** (volet 2) en expérimentant des pratiques de gestion susceptible d'améliorer l'état des peuplements atteints qu'ils soient issus de régénération naturelle ou de plantation.

- **Essayer de quantifier l'impact** de ces anomalies de croissance sur la forêt ardéchoise (volet 3) en évaluant les pertes en volume et en qualité dans les peuplements atteints. Cet aspect permettait de compléter le diagnostic territorial effectué en 2015.

- **Tenter de définir des préconisations** pour les forestiers de la zone étudiée et les diffuser (volet 4) et notamment de localiser les zones à risques pour le cèdre en fonction des facteurs climatiques, topographiques ou pédologiques liés à la présence d'anomalies de croissance.

Photo 1 : Plantation de cèdre de présentant de nombreuses anomalies de croissance, Commune de St Alban d'Ay, 2014 (J. Lemaire, CNPF, 2014)



Les symptômes observés

Contributeurs : CRPF AURA, ONF, IDF-CNPF, DSF, DDAF 07, CIRAD, INRA, Phase 1

La présente étude fait suite à l'observation, à partir de 2010 de différents symptômes dans les peuplements de cèdres du nord de l'Ardèche et en particulier du bassin annonéen.

Outre la mortalité de certains individus, des dessèchements de cime sur plusieurs dizaines de centimètre (photo 2a) et des portions de tronc entièrement dépourvues d'aiguilles et de ramifications (photo 2b) étaient signalés. Des ports buissonnants étaient également repérés mais en plus faible proportion.

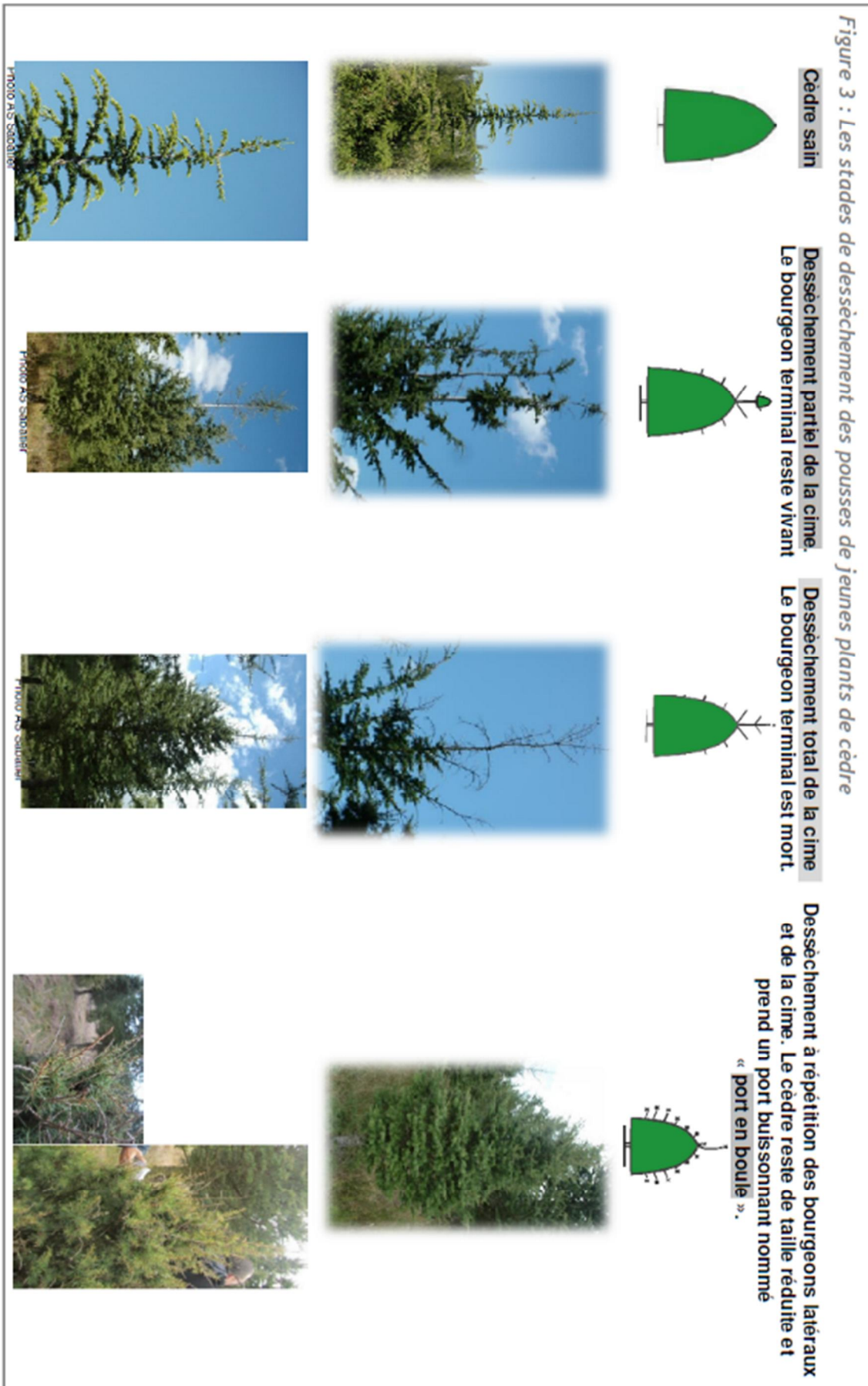


Photos 2 : Anomalies de croissance observées dans le nord de l'Ardèche : à gauche : cimes sèches sur la commune de Savas et à droite, port « en caniche » sur la commune de St Marcel lès Annonay (photos S. Girard, CNPF, 2018).

Une typologie des anomalies de croissance du houppier a été réalisée en 2014 (cf. ci-contre le document tiré du rapport 2015).

Relativement abondants dans le nord de l'Ardèche, ces symptômes sont également présents dans d'autres régions (Haute Loire, Tarn, Aveyron, Hérault...) mais *a priori* absents de la zone méditerranéenne.

Figure 3 : Les stades de dessèchement des pousses de jeunes plants de cèdre



Source : J. Lemaire, 2015

Des anomalies de croissance déjà rapportées par le passé

Contributeurs : IDF-CNPF en collaboration avec DSF et DDAF 07, Phase 2

En Ardèche....

Des cèdres buissonnants et des cimes sèches ont déjà été signalés par le passé en Ardèche. Nous allons essayer d'en dresser les grandes lignes à partir des différents documents recueillis.

1970 : Plantation de Mirabel : Première expertise

Les éléments qui suivent sont extraits du livre de Jean Toth « Le cèdre de France : Etude approfondie de l'espèce » paru en 2005 et dans lequel il relate son expérience ardéchoise sur un peuplement situé à Mirabel (à 6 km à l'est d'Aubenas) :

« L'accumulation d'une masse d'air froid, "effet de cuvette", dans une jeune plantation de cèdres peut freiner sérieusement le démarrage et la croissance initiale. Ce fut le cas de la cédraie de Mirabel dans l'Ardèche. Elle se trouve à 3 km au nord-est du village de Mirabel, village perché sur la bordure du massif volcanique du Coiron, face à la vallée de l'Ardèche et aux plateaux calcaires du bas Vivarais. A côté de la cédraie, se trouve un gîte rural. Il s'agit d'une splendide cédraie âgée de 35 ans fin 2000, d'une surface totale d'un hectare environ. En dessous de celle-ci se trouve une surface plus petite, d'environ un demi-hectare, avec des cèdres âgés de 28 ans.

Cet ensemble de jeunes cédraies a eu quelques difficultés à démarrer. Les arbres, en 1970, à l'âge de 5 ans (plantation en 1965), buissonnaient et présentaient un dessèchement des cimes. Le phénomène a montré une telle ampleur que le CRPF (Centre régional des propriétaires forestiers) de Lyon, à la demande du technicien d'Aubenas, a formé un groupe de travail pour analyser, sur place, les cèdres, soi-disant carencés. L'INRA faisait partie du groupe ; j'y ai moi-même participé à deux reprises. Le spectacle n'était pas beau à voir. Tous les cèdres, sans exception, étaient presque nanifiés, avec les bouts de rameaux et les bouts de flèches desséchés.

Nous avons arraché des plants et les avons examinés : le sol a été également analysé. C'est à ce moment-là qu'on a évoqué pour la première fois, dans le cas du reboisement de cèdres, une possibilité de carence en bore. Puisque le problème était intéressant, des échantillons de plants sains et carencés, venant de l'Ardèche et du Vaucluse, ont été envoyés à Nancy, parallèlement aux laboratoires du sol et de pathologie. L'analyse du sol mentionnait un manque de bore, mais pas en tant que cause principale. On a évoqué souvent le rôle du bore comme oligo-élément ; toutefois personne ne pouvait vraiment vérifier que sa faible teneur ou son absence pouvait carencer les jeunes cèdres à un tel point.

Au cours des visites et recherches sur le terrain, on a pu comparer les cédraies d'âges différents dans des conditions écologiques très diverses. Nous avons alors pensé au froid tardif qui donnait le même symptôme dans les cuvettes, là où il y avait eu de l'accumulation d'air froid, comme dans certaines stations et notamment au pied du petit bois.

Après plusieurs visites et mesures dans la cédraie de Mirabel, on a constaté en 1994 que les hauteurs sur 10 arbres dominants âgés de 30 ans dépassaient les 16 m, ce qui, d'après notre classement les mettait au-dessus de la première classe de croissance. C'est un peuplement vigoureux, où il ne manque aucun arbre dans les lignes bien repérables.

La Revue Forestière Française n° 2/96 a publié un article sur la santé des forêts françaises en 1994¹. L'article parle de dessèchement des pousses de cèdre de l'Atlas en Ardèche. Nous lisons " ces cas semblent correspondre à des introductions dans des conditions stationnelles peu favorables à l'espèce, en particulier sur des substrats acides". Curieuse constatation! La meilleure cédraie de Riassesses dans l'Aude se trouve bien sur sol acide et appartient à la première classe de croissance (le mont Ventoux est dans la troisième). Au Maroc avec 130 000 hectares de cèdres, les plus beaux peuplements se trouvent toujours sur sol acide, dans la région d'Azrou. »

1976/77 : Nouveaux signalements, jugés sans impact important 17 ans après

En 1977 des symptômes de ce type étaient signalés à l'INRA, nous n'avons malheureusement pas pu retrouver traces des compte rendus de l'époque et nous ne disposons donc pas de la localisation de ces placettes. Les constats faits à l'époque pointaient *a priori* une cause édaphique et les risques encourus par le cèdre sur sols acides très filtrants.

Les plantations étudiées par l'INRA en 77 ont été revisitées par le DSF en 1994 (Mirault et Régad, 1995). Quinze ans après, « quelques fourches témoignent de la crise passée mais dans l'ensemble, les peuplements visités sont d'assez bonne venue, et la majorité des arbres a trouvé, sans intervention, une dominance apicale ». Cette constatation a été à l'origine d'une explication du phénomène incriminant une difficulté d'installation du cèdre dans les jeunes années disparaissant avec le développement du système racinaire.

¹ A priori, il s'agit de l'article de MIRAULT (J.) et REGAD (J.) de 1995

1993/1994 : un déséquilibre nutritionnel évoqué mais une crise temporaire surmontable

(sources : rapports de J. Mirault et J. Régad² daté du 21 février 1995 et de J.-M. Haon³ du 14 décembre 1999)

« Les services forestiers ardéchois (CRPF, DDA, ONF) se sont inquiétés en 1993 puis en 1994 de l'état de santé des jeunes plantations de cèdre dont les pousses se dessèchent ; les plants les plus touchés prennent un port buissonnant (port en boule). »

« Les premiers symptômes apparaissent en Juillet-août sur la pousse de l'année, notamment dans le tiers supérieur du houppier : on observe quelques **nécroses corticales rougeâtres** sur les pousses puis le bourgeon terminal sèche puis la pousse terminale se flétrit et meurt. La limite entre tissus sains et nécrosés n'est pas toujours très nette, il s'agit plutôt d'un changement progressif de coloration. Ce phénomène qui n'affecte pas notablement la vigueur des plants, devient spectaculaire au printemps. En effet à la suite des dessèchements de bourgeons et des pousses, le plant prend alors un aspect buissonnant caractéristique notamment lorsque ces dessèchements se produisent depuis plusieurs années consécutives. » Aucun symptôme de ce type n'était alors observé sur arbres adultes.

« Devant l'importance des enjeux et l'apparente extension du problème », une enquête a été réalisée afin d'évaluer l'ampleur du phénomène. Elle a concerné 42 plantations (**âgées de 6/7 ans** ??) soit environ 80 % de celles effectuées à l'époque dans le département. Les résultats sont présentés sur la carte 1. Précisons que seuls les dégâts de dessèchements ont été notés lors des observations, pas les ports buissonnants (rq de Haon, 1999).

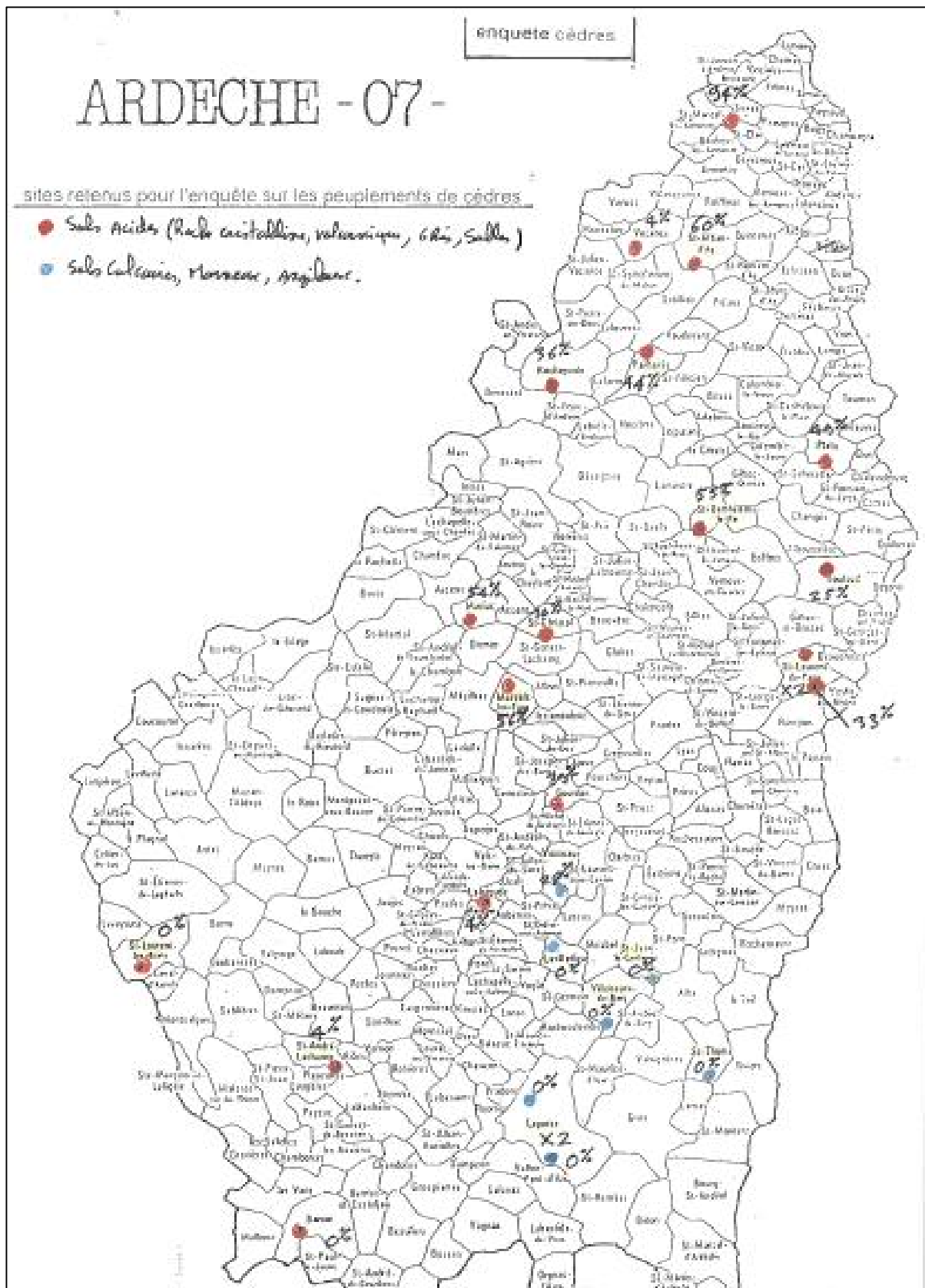
Le rôle de facteurs biotiques (champignons, insecte...) a été éliminé. Les résultats mettaient en évidence que les plantations les plus touchées se situaient au nord du département sur substrat acide (40 % de dégâts en moyenne), que celles situées au sud sur substrat calcaire dur ou marne n'étaient que peu ou pas concernées (de 0 à 4% de dégâts), que les premiers dessèchements étaient apparus 6 ou 7 ans auparavant soit en 1986/87.

Nous touchons ici du doigt une difficulté d'interprétation de la situation ardéchoise dans la mesure où la nature du substrat géologique se superpose aux caractéristiques climatiques : les zones calcaires correspondent en effet aux zones les plus chaudes.

Les symptômes observés ne résultaient pas d'effets directs de stress hydriques (R. Huc cité par Mirault et Régad) mais des effets indirects (impactant la nutrition minérale) étaient néanmoins évoqués en raison de l'apparition des nécroses en période estivale.

² J. Mirault et J. Régad étaient tous les deux rattachés à l'échelon technique inter-régional Sud-Est de département Santé des Forêts du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

³ J.-M. Haon travaillait à la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de l'Ardèche (DDAF) et était correspondant-observateur du Département Santé des Forêts



Carte 1 : Localisation des 25 plantations (âgées de 2 à 13 ans) observées par la DDAF de l'Ardèche en 1994 (Source : P. Granjon, DDT07).

En 1995, deux analyses de sol réalisées à l'initiative de la DDAF07 « font apparaître des carences en oligo-éléments, notamment en manganèse. Pour le bore (qui était mis en causes en 78 lors des analyses effectuées par l'INRA), il apparaît que les teneurs sont optimums mais qu'il existe un problème d'assimilation par les arbres. Ceci est confirmé par des analyses foliaires réalisées à la même période. »

Selon les conclusions des investigations de 94/95, l'assèchement des couches superficielles du sol (très filtrant) en entraînant un déséquilibre dans l'alimentation minérale des jeunes cèdres, pourrait être à l'origine du phénomène. Le phénomène ne serait que temporaire- les peuplements touchés en 76/77 s'étant « refaits » en 94/95- et la crise serait surmontée après que les plants aient passé le cap des 2m/2,50 m de hauteur.

1999 : Nouvelle enquête dans le nord du département : un problème qui perdure et impactera durablement les plantations touchées (source : rapport de J.-M. Haon⁴ du 14 décembre 1999)

Des observations (symptôme de dessèchement et de buissonnement) et des analyses chimiques ont été faites sur 6 sites choisis les tranches de dégâts (% d'arbres affectés) observés en 93/94 : de 0 à 25 % (sites peu touchés => 2 placettes observées), de 26 à 60% (sites touchés => 3 placettes observées) et de 61 à 100 % (sites très touchés => 1 placette observée).

Les plants observés avaient entre 8 à 13 ans, avec une hauteur moyenne des dominants- généralement indemnes- de 4 à 5 m. Selon les tables de production établies pour l'espèce dans le Sud Est, les plantations observées se situent au-dessus de la courbe de croissance de la première classe de fertilité. Les arbres dominés- généralement atteints- avaient des hauteurs allant de 0,5 à 2,5 m.

Les résultats de ces observations figurent dans le tableau ci-dessous ; la proportion d'arbres atteints en 99 par un dessèchement- qu'il soit récent ou pas- figure en rouge (colonne A) ; le nombre en bleu correspond aux arbres atteints récemment.

⁴ J.-M. Haon travaillait à la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de l'Ardèche (DDAF) et était correspondant-observateur du Département Santé des Forêts

	DESSECHEMENTS 99	DESSECHEMENTS 94	BUISSONNEMENTS 99
COMMUNES	TOTAL en % A	TOTAL en % B	TOTAL en % C
AGE DES ARBRES			
SAVAS			
10 ans	98 56	94	98
ST. ALBAN D'ay			
8 ans	86 62	60	68
PLATS			
12 ans	68 30	48	56
MARIAC			
13 ans	44 26	41	28
ST.CHRISTOL			
9 ans	10 6	10	12
ST.LAURENT DU PAPE HAUTEVILLE			
8 ans	64 42	10	44

Dans 4 sites sur 6, le nombre de plants présentant un dessèchement a nettement progressé sur les 4/5 dernières années. Par ailleurs, le phénomène s'est poursuivi après l'enquête de 93/94 et était toujours actif partout.

Les analyses réalisées sur ces six plantations, situées sur sols essentiellement granitiques, n'ont pas permis de mettre en évidence une carence en bore (Normand, DSF Sud-Est, communication personnelle cité par Legrand, 2003).

Contrairement au rapport précédent, celui de J-M. Haon remet en cause la conclusion optimiste donnée 5 ans auparavant identifiant un phénomène temporaire et surmontable car l'état des peuplements observés lors de cette nouvelle enquête s'est encore dégradé. Il conclut d'ailleurs sur la nécessité d'un « gestion adaptée » de ces peuplements.

1999 : Des essais de plants mycorhizés et d'amendement qui tournent court (source : rapport DDAF07 du 12/03/01)

Pour tenter de corriger les anomalies de croissance observées, la DDAF 07 entreprend de suivre le devenir de 5 placettes installées dans des plantations réalisées au printemps 1999 sur les communes de Pailhares et Vandevant (à 17 km au sud d'Annonay). Le choix de l'échantillon correspond à des profondeurs de sol différentes, les sols plus profonds (+60 cm) étant a priori épargnés par le dépérissement au contraire des sols squelettiques. Sur chaque parcelle, 30 plants de cèdre mycorhizés ou non, ont été observés 2 et 3 ans

après plantation. Sur deux d'entre elles, du calcaire broyé (dosé à 60 % de calcium) a été apporté sur la moitié des plants à raison de 350 grammes/plants (Pailhares). L'impact de cet amendement n'a pu être évalué car les parcelles ont été détruites par un incendie en 2003. Les résultats portés ci-dessous correspondent aux données récoltées en mars 2001 soit 3 saisons de végétation après la plantation et plus précisément à la proportion de plants mycorhizés (M) ou non (NM) présentant un dessèchement de la dernière pousse.

1. Pailhares 1 : « zone basse, sol assez riche »
=> 7 % de plants touchés (0% NM et 10 % M)
2. Pailhares 2 : « zone haute, sol superficiel »
=> 63 % de plants touchés (50% NM et 69 % M)
3. Vaudevant 1 : « zone haute de crête, sol assez superficiel »
=> 13 % de plants touchés (5% NM et 30 % M)
4. Vaudevant 2 : « zone basse, sol moyen »
=> 10 % de plants touchés (10% NM et 10 % M)
5. Vaudevant 3 : « zone de plateau, sol moyen »
=> 47 % de plants touchés (30% NM et 80 % M)

On notera que les dessèchements sont présents sur l'ensemble des parcelles, que les plants mycorhizés sont plus touchés mais qu'ils sont également les plus grands (+ 10 à 30 % sur la hauteur comparativement aux plants non mycorhizés).

2007 et 2008 : Nouvelle alerte dans le bassin annonéen (sources : rapports de B. Boutte⁵ de juillet 2007 et septembre 2008)

En forêt communale de Roiffieux, à 700 m d'altitude, des mortalités d'arbres de 10/15 cm de diamètre (11/15 m de hauteur) sont observées dans un peuplement d'une soixantaine d'année issu de régénération naturelle. La mort des arbres est datée de 1 à 3 ans (soit 2006 à 2004). Des dessèchements et rougissements en cime ainsi que la présence de quelques branches rouges isolées dans le houppier sont également notées. Les dépérissements observés auraient été déclenchés par la sécheresse-canicule de 2003 du fait de facteurs prédisposants que sont : des conditions stationnelles non optimales pour le cèdre (sol acide et filtrant) ainsi que la déstabilisation des arbres suite à la tempête de 1999 et une densité excessive par endroit. Les sécheresses de 2004, 2005 et vraisemblablement 2006 auraient aggravées les choses.

Dans la même forêt à 500 m d'altitude, des « dessèchements de cimes entraînant un aspect buissonnant des arbres », des « cimes étroites ou buissonnantes » et des arbres de forme « pyramidale » sont observés dans une plantation âgée de 20 ans. Les arbres ont 3 à 8 m de hauteur et les anomalies de croissance sont disséminées. Selon l'auteur « les symptômes observés sont typiques d'un problème dû à une carence en

⁵ B. Boutte travaille à l'échelon technique Sud-Est du Département Santé des Forêts

bore, des cèdres associée à des stress hydriques », phénomène déjà observé dans le nord de l'Ardèche, sur des sols acides filtrants et pauvres en matière organique.

Dans une plantation de 2003 (6^{ième} année de végétation) à St Marcel-lès-Annonay à 650 m d'altitude, des symptômes sont observés sur les plants depuis l'année 2005. Lors de la visite en juillet 2008, certains plants (de 30 à 60 % selon les secteurs) présentaient des dessèchements de bourgeons et/ou de pousses, terminales ou latérales ; certains avaient un aspect buissonnant suite à des dessèchements successifs. Les hauteurs variaient de 50 à 100 cm. Dans ce cas également, B. Boutte incrimine une carence en bore éventuellement associée à des stress hydriques ; selon lui, « la position topographique (laquelle ? à creuser car non mentionnée) de la plantation permet également d'évacuer l'hypothèse de dégâts de gel tardif ».

Des symptômes similaires ont également été observés en juillet 2008 sur une autre plantation de cèdres à St Marcel-lès-Annonay installée celle-ci en 1987 ainsi que sur des semis naturels âgés de quelques années, aux alentours du barrage du Ternay.

...et ailleurs.

Nous ne rapportons ici que les études les plus connues relatives aux anomalies de croissance sur le cèdre de l'Atlas.

En Haute Loire : Carence en Bore sur gneiss près de Langeac

Legrand (2003) rapporte les difficultés de croissance de deux plantations de 1985 sur la commune de Langeac (densité de plantation de 1 100 et 1 000 tiges/ha). Dix ans après plantation, une première visite avait permis de noter le dessèchement des pousses terminales et latérales conférant un aspect buissonnant à de nombreux arbres qui ne dépassaient pas un mètre de haut ; les dégâts étaient disséminés, avec environ 60 % des cèdres atteints sur la parcelle située à 780 mètres d'altitude en crête et haut de versant, et la presque totalité des arbres sur une partie de la seconde parcelle située en haut de versant et exposée au Nord-Est.

Cinq ans plus tard, « les plantations étaient mieux venantes, et un certain nombre d'arbres avaient une bonne croissance (5 et 7 m de hauteurs pour les dominants) ; cependant des symptômes étaient toujours présents : nanification et jaunissement des aiguilles des pousses, et dessèchement de pousses par leur extrémité, le bourgeon ne s'étant pas formé ; ce phénomène répété d'années en années a entraîné le buissonnement de certains arbres, tandis que d'autres sujets sont arrivés à le surmonter. Dans chaque plantation, environ 60 % des arbres présentaient encore des symptômes plus ou moins prononcés. »

Le substrat géologique des deux parcelles correspond à des gneiss anatectiques à biotite, avec un sol sablo-limoneux peu acide et peu profond avec une forte charge en éléments grossiers. Par ailleurs, l'enherbement était important. Les analyses réalisées (analyses foliaire et du sol) ont permis de diagnostiquer une carence en bore chez les arbres.

En Corrèze : carence en Bore sur granite à St Julien aux Bois (50 km à l'Est de Brive)

Legrand rapporte en 2006 le cas d'une plantation réalisée en 1997 sur une ancienne terre agricole située à 560 m d'altitude en position topographique plane sur la commune de Saint-Julien-aux-Bois. Sept ans après plantation, la mortalité cumulée depuis la plantation était d'environ 10 %, mais seuls une quinzaine de plants présentaient une dominance apicale et satisfaisante et mesuraient environ 2.5 m de hauteur ; les autres arbres étaient buissonnants, et atteignaient 1 à 1,5 m de hauteur.

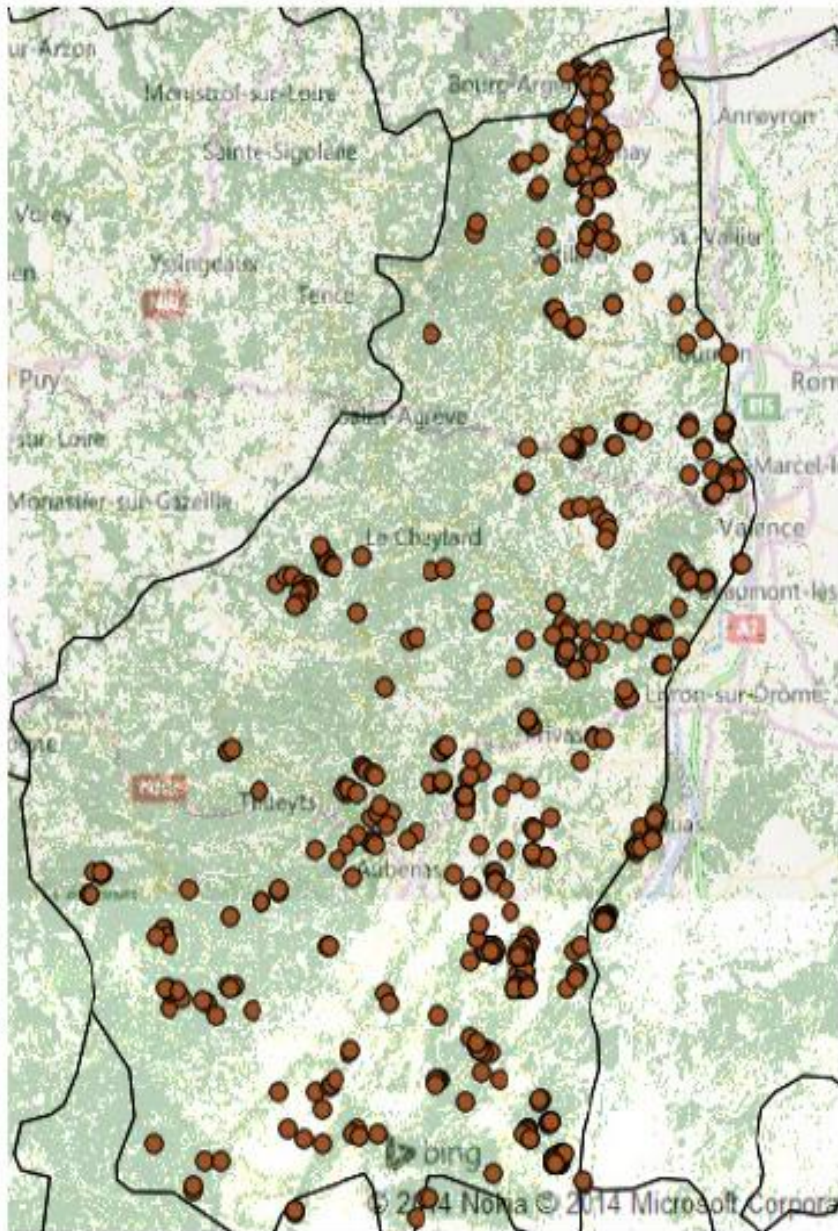
Les symptômes étaient semblables à ceux observés en Haute Loire quelques années auparavant. « Un comptage effectué au printemps 2005 sur 400 arbres dénombrait ainsi, à l'issue de la saison de végétation 2004, 31 % d'arbres avec une flèche individualisée, 24 % d'arbres avec une cime multiple (plusieurs flèches à dominance apicale), et 45 % d'arbres tout à fait buissonnants (pas de dominance nette d'une pousse) ; mais des flèches étaient aussi en cours de dessèchement sur les cèdres à flèche individualisée ou à cime multiple, entraînant une perte de dominance apicale pour la saison suivante. »

Les symptômes observés et les analyses réalisées ont mis en évidence une carence en bore, liée à la très faible teneur du sol en cet élément. Une expérience de fertilisation a été menée sur ce site, qui a notamment montré qu'un apport de bore (Solubor®DF à 40 g/plant) avait eu un effet hautement significatif sur la réduction du dessèchement de pousses (Legrand 2006).

Localisation des cédraies en Ardèche

Contributeurs : CRPF AURA et IDF-CNPF, Phase 1

Lors de la première phase de cette étude, la plupart des boisements de cèdre atteignant au moins 5 m de hauteur qu'ils soient issus de plantation ou bien de régénération naturelle ont été localisés sur l'ensemble du département. Pour y parvenir, différentes sources d'informations ont été mobilisées : les données de l'IGN, des informations recueillies auprès du personnel du CRPF et de l'ONF et de gestionnaires ainsi que des photographies aériennes (après calage sur le terrain). Les 552 parcelles repérées sont localisées sur la carte 2.



Carte 2 : Localisation des 552 peuplements de cèdre ayant en 2014 une hauteur minimale de 5 mètres (CNPF, 2015)

Etat sanitaire des cédraies ardéchoises

Contributeurs : IDF-CNPF, CRPF AURA et ONF, Phase 1

Parmi les 552 cédraies inventoriées précédemment, un premier échantillon de 41 placettes a été choisi aléatoirement pour estimer l'ampleur du phénomène des anomalies de croissance (soit 7 % de l'effectif). Un second échantillon, stratifié selon la nature de la roche mère (basique /acide) et le déficit hydrique estival (P- ETP de mai à aout inclus) a été effectué pour essayer d'appréhender les facteurs corrélés au phénomène. Calibré initialement pour représenter un quart des parcelles recensées dans le département, les deux échantillons ont finalement concernés 81 peuplements (issus de plantations ou de régénération naturelle) soit 15 % des cédraies ardéchoises (cf. le rapport 2015 pour plus de détails).

Chacun d'entre eux a fait l'objet d'une description et de mesures :

- dendrométrie : hauteur dominante et âge du peuplement ;
- sol : pH, % éléments grossiers, texture dominante, roche mère ;
- topographie, exposition
- état sanitaire des 20 premiers cèdres dominants ou co-dominants situés autour du centre de la placette (déficit foliaire, mortalité de branches, intensité et longueur des écoulements de résines, type de dessèchement des cimes...)
- climat : données climatiques recueillies en introduisant les coordonnées géographiques de chaque placette dans différents modèles : Aurelhy (de Météo France, pour les températures sur la période 1981/2010), Safran (de Météo France pour les données annuelles, Digitalis (d'AgroParisTech pour le rayonnement), Auritalis (« Hybride » Météofrance et Agroparistech élaboré par Jean Lemaire pour calculer le déficit hydrique climatique = P-ETP à une échelle de 50 m).

Des corrélations (arbre de décision et régression logistique) ont ensuite été recherchées entre l'état sanitaire des peuplements et les variables du milieu.

Principaux résultats (cf. le rapport 2015 pour l'ensemble des résultats)

Le % de tiges affectées par un dessèchement de cime est la variable choisie pour caractériser l'état sanitaire dans cette première approche. Elle est corrélée très significativement ($p < 0.01$) aux autres variables descriptives de l'état sanitaire des arbres observés (intensité du déficit foliaire, % moyen de branches mortes, % moyen de cimes anormales, longueur moyenne anormale vivante et longueur de cime morte, longueur d'écoulement de résine sur le tronc).

60 % des peuplements étudiés présentent des dessèchements de cimes (résultat identique pour l'échantillon aléatoire et l'échantillon stratifié). Le phénomène est présent sur **l'ensemble du département** (cf. carte 2) **même si il l'est davantage dans la moitié nord.**

Les 2/3 des peuplements touchés ont moins de 15 % de tiges atteintes et seulement **8 % présentent des dégâts sur plus des ¾ des arbres.**

Les 2/3 des parcelles dont l'âge a pu être renseigné ont **entre 20 et 40 ans** et ont une hauteur dominante comprise **entre 10 et 20 m.**

En première analyse, la hauteur dominante des peuplements présentant des dessèchements de cime ne semble pas différente de celle des peuplements dépourvus de symptômes. Cet aspect a été approfondi dans la seconde phase du projet par une étude spécifique.

Corrélations entre état sanitaire des cédraies et facteurs du milieu

Contributeurs : IDF-CNPF, Phase 1

L'analyse plus poussée des données récoltées lors de l'étude décrite précédemment a permis de rechercher des liens statistiques entre la proportion de dessèchements de cime dans une parcelle et différentes variables du milieu. Aucune corrélation significative n'a été mise en évidence entre dessèchement et nature du substrat géologique : le phénomène est présent aussi bien sur roches acides (grès, granite, schiste) que sur roches basiques (basalte et calcaire) et aucune

De la même façon, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre le bilan hydrique-en particulier estival- et la présence de dessèchements. Ce résultat est à rapprocher des observations faites par les forestiers localement qui observaient des dégâts sur cèdre à proximité de parcelles d'épicéas ou de douglas ne présentant aucun signe de faiblesse alors que ces essences sont *a priori* plus sensibles au déficit hydrique.

Néanmoins, il convient de rappeler que le département ardéchois a la particularité de présenter un lien statistique fort entre variables climatiques et type de roche : Plus on va au sud plus il fait chaud et plus on rencontre des roches calcaires. Plus on va vers l'ouest et le nord plus il fait froid et plus on y rencontre des roches acides de type gneiss ou granite.

A noter un nombre plus élevé de tiges affectées dans les parcelles situées en **haut de versant** -situations généralement plus exposées aux vents- que dans des parcelles situées sur des versants ou des plateaux (21 % contre 12 %).

Les analyses statistiques en arbre de décision et régression logistique (type Forward Logit) ont fait ressortir deux principaux critères corrélés à la présence de dessèchements de cimes ($p < 0.05$) :

- **les températures minimales du mois de mars** (moyenne 1981-2010)
- **la position topographique.**

Les résultats obtenus, permettent de délimiter trois zones de vigilance climatiques et de spatialiser la probabilité d'observer des dessèchements de cimes (arbre de segmentation ci-après).

En zone de vigilance climatique modérée (faible risque), 10 % des tiges sont affectées par un dessèchement de cime, elles sont 24 % en zone de vigilance maximale.

VIGILANCE CLIMATIQUE MODEREE

→ $TN03 \geq 3^{\circ}\text{C}$ (altitude moyenne 500 m*) = faible risque de dessèchement sur les zones situées dans les positions topographiques de versant, plateau modéré ou de haut de versant

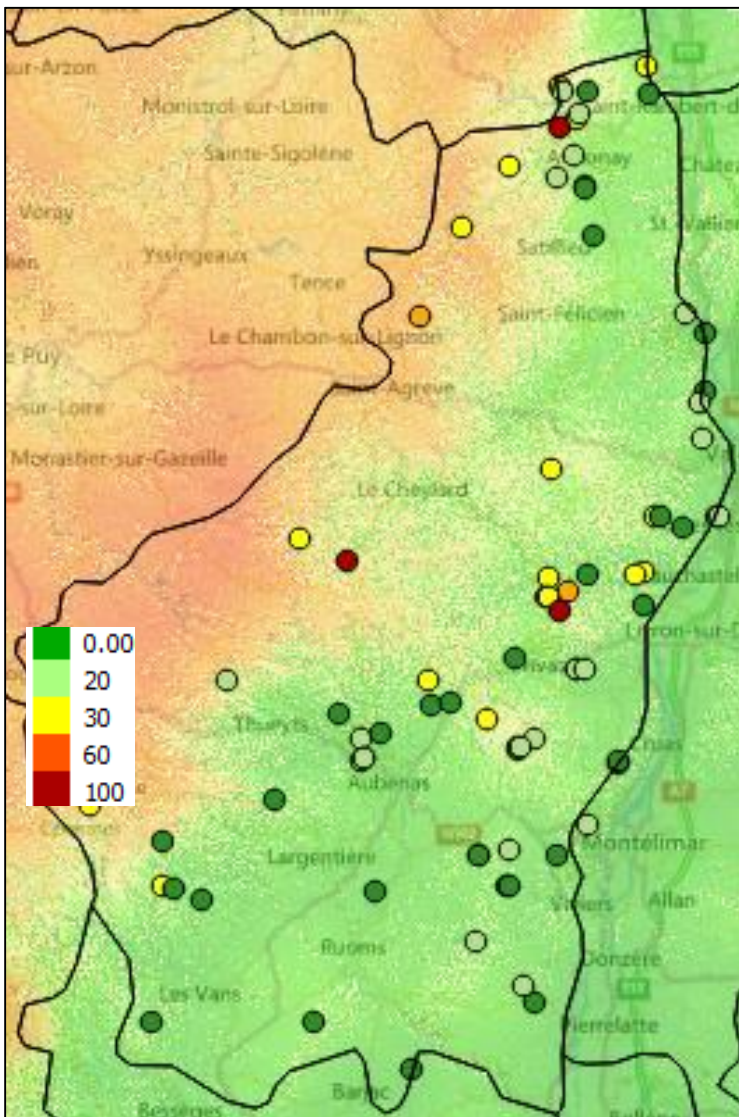
VIGILANCE CLIMATIQUE ELEVEE

→ $2,2$ (altitude moyenne 600 m*) $\leq TN03 < 3^{\circ}\text{C}$ (altitude moyenne 500 m*) = faible risque en versant ou plateau et risque élevé en haut de versant

VIGILANCE CLIMATIQUE MAXIMALE

→ $TN03 < 2,2$ (altitude moyenne 600 m*) = risque élevé de dessèchement de cime dans toutes les situations topographiques

*en versant nord retranché 200 m et en versant sud ajouté 200 m aux valeurs citées



La carte ci-contre présente la probabilité d'observer le phénomène de dessèchement de cime sur une parcelle. Cette probabilité est fonction de la température minimale de mars calculée par les modèles climatiques en ce point et l'indice topographique également calculé par un modèle numérique de terrain. Il s'agit de la carte de vigilance climatique pour le cèdre, sa résolution est de 25 m.

Carte 3 : Carte de vigilance climatique pour les peuplements de cèdres. Les points correspondent aux parcelles « échantillon » décrites et mesurées, le code couleur correspond à leur niveau de vigilance. (J. Lemaire, CNPF, 2015)

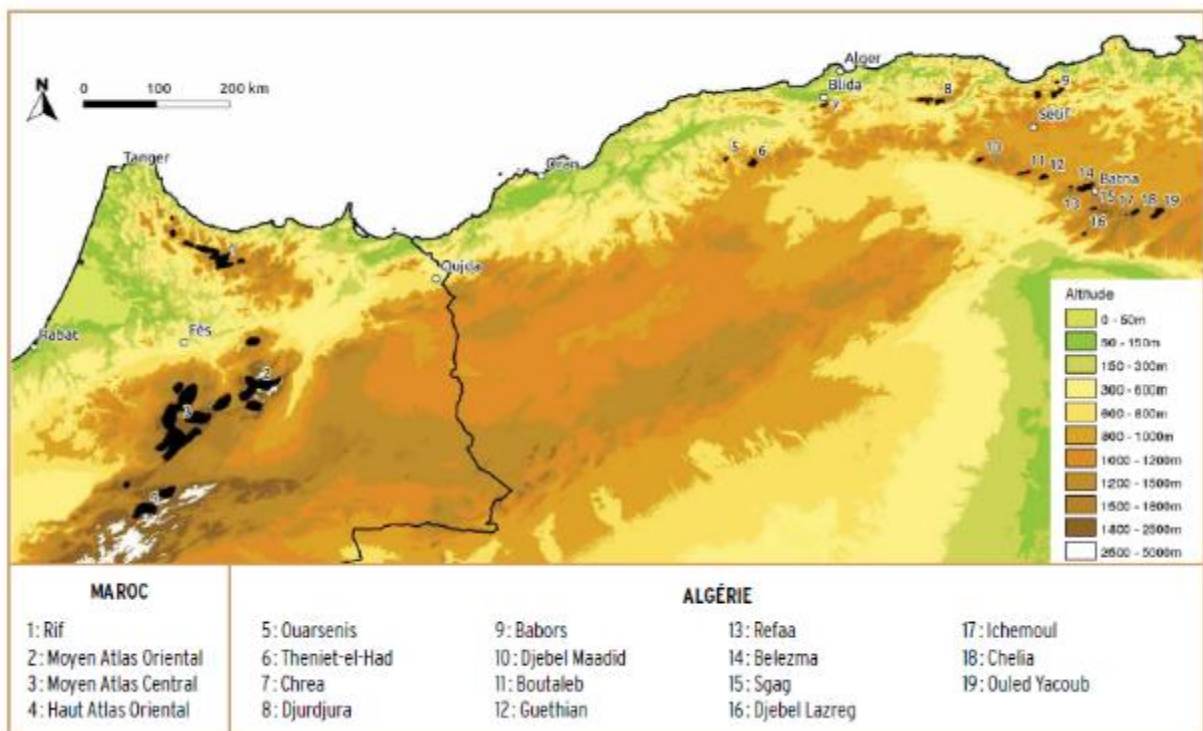
Le cèdre et le froid

Éléments bibliographiques et application au territoire ardéchois

Contributeurs : IDF-CNPF, Phase 2

Dans son aire d'origine...

Le cèdre de l'Atlas est originaire du massif montagneux éponyme qui borde le continent africain au nord-ouest. L'espèce est actuellement présente au Maroc (environ 133 000 ha), dans le Haut Atlas oriental et le Moyen Atlas entre 1 600 m et 2 200 m et dans le Rif (de 1 400 à 1 600 m d'altitude). En Algérie, son aire actuelle (environ 15 000 ha) est plus morcelée dans l'Atlas Blidéen et le massif des Aurès avec des limites altitudinales similaires (1400/2200 m) (carte 4).



Carte 4 : En noir, aire actuelle de répartition du cèdre de l'Atlas (Courbet et coll., 2012)

Les peuplements actuels de cèdre de l'Atlas vivent sous des climats montagnards de type méditerranéen, lumineux et secs une grande partie de l'année, avec des hivers, souvent enneigés mais sans froid excessif, et des étés courts et chauds. La pluviométrie totale y est assez variable selon la latitude mais sa répartition dans l'année fait toujours état de 2 à 4 mois secs.

Les températures annuelles moyennes varient « de 7,5°C à 15°C, avec une moyenne des minimales du mois le plus froid comprises entre - 1°C et - 8°C et une moyenne des maximales du mois le plus chaud pouvant aller jusqu'à + 32°C. Il peut résister à des températures allant jusqu'à + 41°C mais ne peut subsister, en dormance, en dessous de - 25°C » (M'Hirit et Benzyane, 2006 in Courbet et coll., 2012).

Comme les résultats de la phase 1 de l'étude ardéchoise impliquaient le froid dans les anomalies de croissance observées, nous avons regardé les températures minimales auxquelles le cèdre de l'Atlas était soumis dans son aire d'origine.

Des données climatiques ont été récupérées pour la ville de Batna (Algérie) et d'Ifrane (Atlas marocain) sur les sites météorologiques tutiempo et meteoblue⁶. A partir de ces données, la température minimale absolue⁷ atteinte a été calculée à l'altitude limite du cèdre de l'Atlas à savoir 2200 m et cela pour différentes années.

Selon ces données, la température minimale absolue serait de -17 °C avec une moyenne des extrêmes se situant à -14 °C à 2200 m dans la région proche de Batna (cf. Fig.1) ; valeurs très proches de celles calculées pour la région d'Ifrane au Maroc (température minimale absolue légèrement plus élevée avec une moyenne des extrêmes plus proche de - 13 °C).

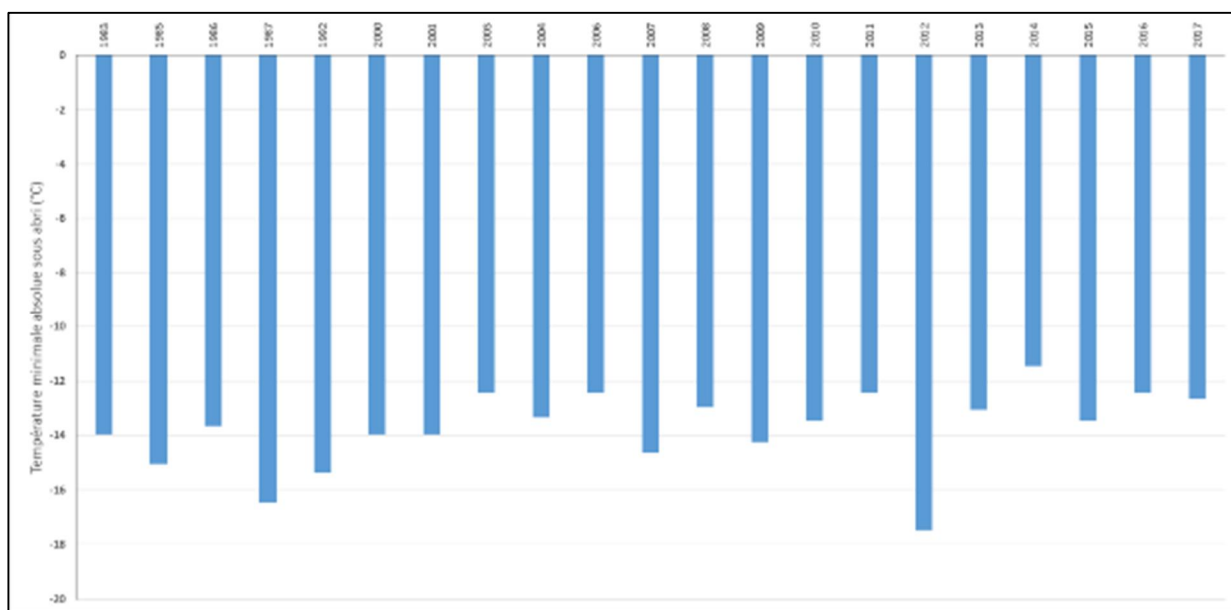


Fig. 1 : Valeurs calculées des températures minimales absolues atteintes depuis 1993 sous abri à 2 200 m d'altitude dans la région de Batna (J. Lemaire, CNPF, 2018)

⁶ <https://fr.tutiempo.net> et <https://www.meteoblue.com>

⁷ Cette température est issue de modèles et calculée sous abri

La littérature mentionne une sensibilité aux fortes gelées des cèdres en général, le cèdre de l'Atlas étant la moins sensible comparativement à *Cedrus libani*, *C. brevifolia* et *C. deodara*. Le minimum absolu toléré par *Cedrus atlantica* varie de -15 °C à -25 °C selon les parties de l'arbre concernées et la période de l'année où le froid intervient (sources). Le gel peut ainsi provoquer des destructions du cambium et des cernes dit roulés (sources).

Comparativement à d'autres espèces, la bibliographie situe le cèdre de l'Atlas comme assez sensible au froid, à un niveau très proche de celui du pin taeda mais plus sensible que le pin maritime et les sapins méditerranéens comme l'illustre la figure 2 récapitulant les seuils de résistance au froid répertoriés dans la littérature pour différentes espèces et issus de la base de données bioclimsol © CNPF.

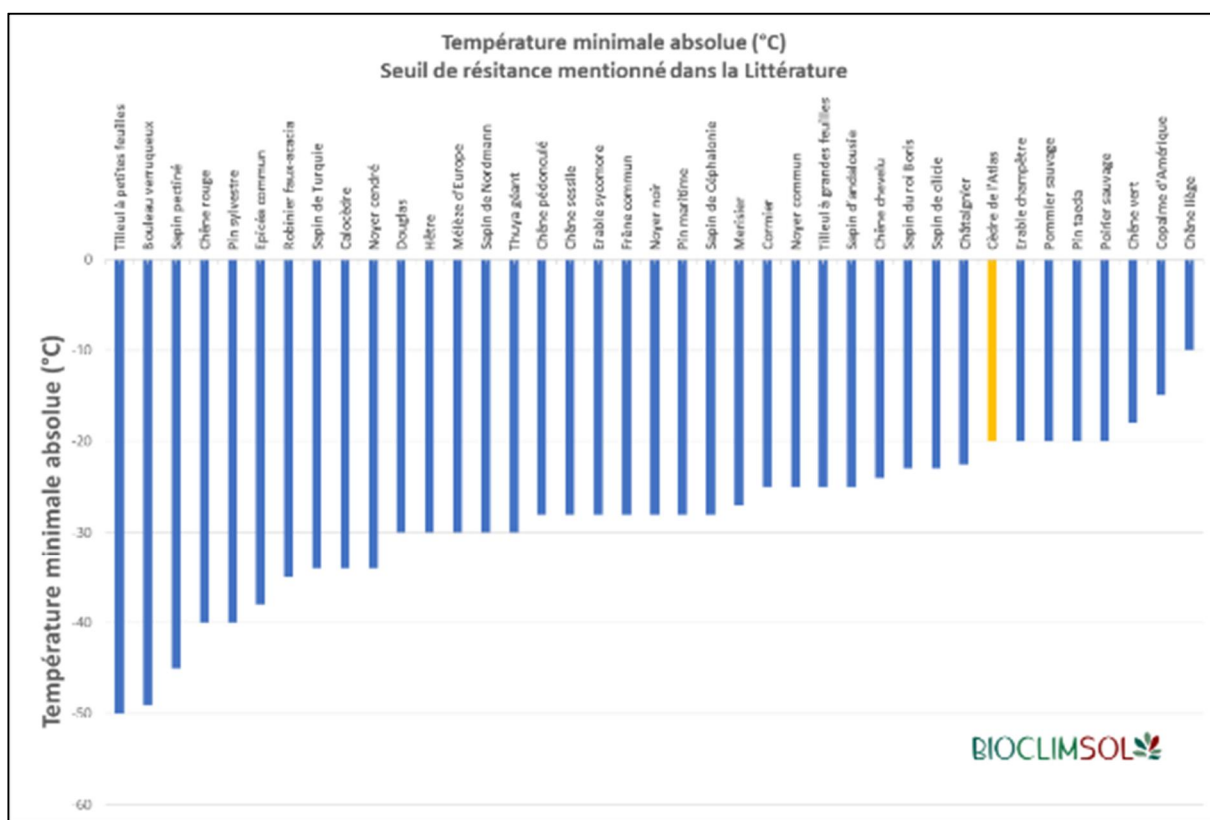


Fig. 2 : Seuils moyen de résistance à la température minimale absolue d'après la bibliographie pour différentes essences (J. Lemaire, CNPF, 2018, bioclimsol © CNPF)

...en France...

Dans son aire d'origine, le cèdre de l'Atlas n'est donc pas soumis à des températures absolues aussi froides que celles qui jalonnent le climat français : février 1956, janvier 1963, janvier 1985, mars 2005, pour ne citer que les plus extrêmes.

Ainsi, suite à l'épisode de 1956, des dégâts importants sur cèdre de l'Atlas ont été rapportés dans les arborétums situés au-dessus de 900 m à proximité de l'Aigoual et dans celui d'Amance (Meurthe et Moselle, à 400 m d'altitude environ) (Debazac, 1962). Dans le petit Luberon (83), des roulures observées ultérieurement ont été datés de cette année-là. [\(source\)](#)

Toth (2005) signale que les jeunes semis de cèdre ne résistent pas aux températures très basses (-20°/-25°C), qu'ils jaunissent, perdent tout ou partie de leurs aiguilles voire, meurent. Sur des terrains humides, hydromorphes, des températures plus élevées peuvent occasionner des dégâts. Ainsi les froids de janvier 1985 (-17°C) et février 1986 (-11°C), à Vignères près d'Avignon, ont provoqué la chute partielle des aiguilles.

Selon cet auteur, l'épiderme des plants plus âgés peut geler et provoquer des dégâts internes (cf. Photo 3).

Photo 3 : Fissure de l'écorce sur jeune cèdre suite à un gel à Cadalen dans le Tarn (photo J. Toth, 2005).



...et en Ardèche.

Compte tenu de ces éléments, qu'elles sont les températures minimales que les cèdres installés en Ardèche ont eu à supporter ces dernières années ?

La figure 3 (page suivante) rend compte des températures minimales absolue du mois de mars entre 1961 et 2012 en Ardèche en fonction de la zone de vigilance établie lors de la phase 1 (carte 3). Ainsi, la courbe en pointillés rouge correspond aux minima du territoire ardéchois où le risque d'avoir des anomalies de croissance sur le cèdre est considéré comme maximal et en pointillés vert au territoire où ce risque est le plus faible. Les valeurs ont été calculées à partir de modèles climatiques et des données Safran de Météo France par J. Lemaire.

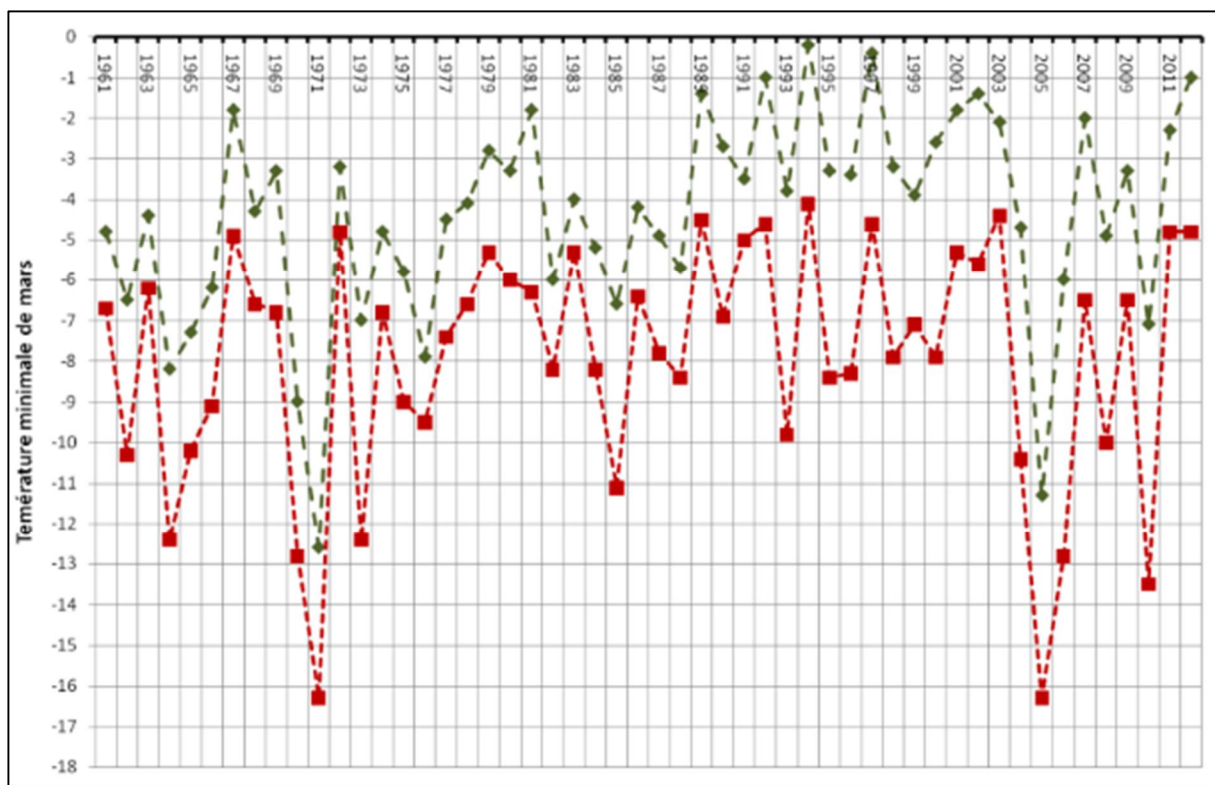


Fig. 3 : Evolution de la température minimale du moins de mars de 1961 à 2012 sur l'Ardèche pour les territoires situés en zone de vigilance élevée pour le risque de cime (en rouge) ou en zone de vigilance faible (en vert) (J. Lemaire, CNPF, 2018).

Sur les cinquante années considérées, des températures inférieures à -10°C en mars ont été enregistrées en 1962, 1964, 1965, 1971, 1973, 1985, 2004, 2005, 2006 et 2010. Ces années-là, la différence de température entre les zones à forte et faible niveau de vigilance était en moyenne de l'ordre de 5°C : -11.2°C en zone de vigilance faible contre -16.3°C en zone de vigilance élevée, -7.2°C en 2010 en zone de vigilance faible contre -13.5°C en zone de vigilance élevée.

Compte tenu de ces éléments, les anomalies de croissance observées en Ardèche pourraient-elles être liées à des fortes gelées ou bien à une plus grande sensibilité des cèdres à des gels modérés ?

Afin de tester ces hypothèses un ensemble d'actions a été mené par l'équipe « Micro-Environnement et Arbre » de l'unité mixte de recherche PIAF⁸ de l'INRA de Clermont Ferrand, sous l'égide de Thierry Améglio.

⁸ PIAF pour Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant

Vulnérabilité au gel du cèdre dans le bassin d'Annonay

Contributeurs : PIAF-INRA, Phase 2

Suite aux résultats obtenus lors de la première phase du projet, l'hypothèse a été faite que les anomalies de croissance observées en Ardèche pourraient être dues à une modification des processus physiologiques liées à l'endurcissement ou plutôt au désendurcissement précoce des arbres au froid. Les modifications climatiques de ces dernières années et notamment la plus grande douceur de la période automno-hiverno-printanière de ces dernières années pourraient conduire à ce que les cèdres soient plus sensibles aux gels.

L'INRA a donc mené une série de travaux pour tester cette hypothèse en suivant l'évolution du niveau d'endurcissement au froid de certains arbres au cours de deux hivers dans deux parcelles. Ces parcelles étaient par ailleurs instrumentalisées par des micro-dendromètres autonomes (système PépiPIAF) qui ont permis de suivre en continu, les variations de diamètres des troncs liées à la croissance, à l'état hydrique et à l'état physiologique des arbres.

L'ensemble des méthodes utilisées et des résultats obtenus fait l'objet d'un document annexé à ce rapport (annexe 1). Ne sont ici présentées que les conclusions du travail réalisé.

Gel ; une vulnérabilité proche de celle du noyer

Il a ainsi été montré que le cèdre présentait une vulnérabilité au gel⁹ à l'automne et au printemps avec un seuil critique de température vers -15°C. Il a également été observé des capacités d'acclimatation à l'automne permettant à cette espèce d'être endurcie à supporter des températures jusqu'à -28°C en hiver. L'année 2018, a également montré que cette plasticité de la résistance au gel pouvait varier assez rapidement avec les températures de l'air. Ainsi début mars 2018, on a observé après un mois de février aux températures très basses (22 jours de gel), un endurcissement plus fort qu'au mois de janvier de la même année. Cet endurcissement au gel a de plus totalement disparu un mois plus tard, début avril, où la résistance au gel n'est plus que de -15°C.

Ainsi on peut envisager que les années où les températures hivernales en janvier et surtout février sont plus douces, le niveau d'endurcissement en mars puisse être nettement plus faible qu'une année où l'hiver est froid.

⁹ Vulnérabilité au gel estimée par le LT50, variable correspondant à une estimation de la température induisant une lyse cellulaire entraînant la mort de l'organe (Améglio et coll., 2018).

Les déterminations de LT50 ont permis d'estimer le pourcentage de dommage en fonction des températures subi aux différentes périodes. Les risques simulés semblent faibles, mais non nulles (Fig. 4). Le pourcentage de dommage atteindrait les 25% à l'automne et serait de 15% au printemps pour un seul gel à -15°C, sans tenir compte de conditions climatiques plus douces que ces deux années d'expérimentation et avec des arbres moins endurcis que ceux étudiés.

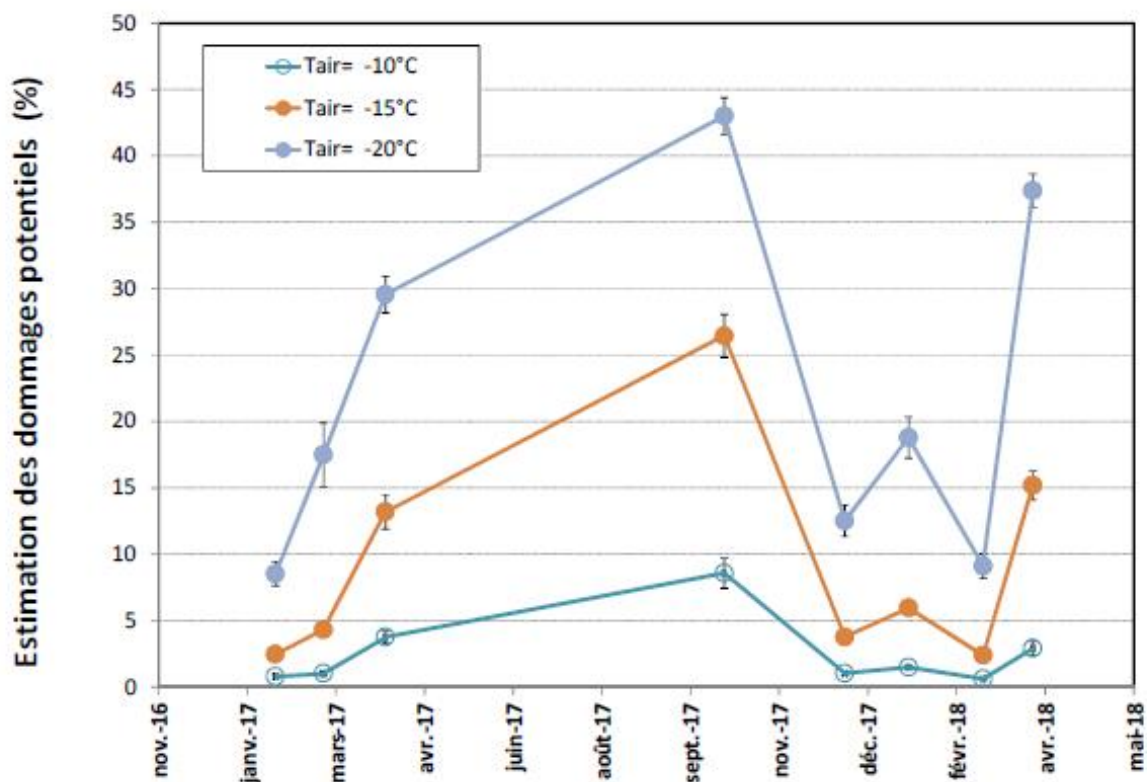


Fig. 4 : Estimation des dommages potentiels (%) pour chaque date de prélèvement, tout organes confondus selon la température de l'air simulé (-10°C, -15°C ou -20°C respectivement), $n=30 \pm$ erreur type (Améglio et coll., 2018, annexe 1).

Dans tous les cas, cette espèce n'est pas très résistante au gel, avec une vulnérabilité proche de celle d'un noyer fruitier, espèce réputée comme sensible au gel et dont la limite altitudinale est proche des 700 m d'altitude (Charrier et coll., 2013). Le cèdre semble donc bien moins résistant que beaucoup de conifères mesurés avec la même méthodologie (Charra-Vaskou et coll. 2012).

Enfin il faut ne pas perdre de vue que le symptôme est souvent décrit en cime avec un dessèchement de la « flèche » des cèdres, or la vulnérabilité n'a jamais été déterminée sur cette partie et on ne peut exclure une différence d'endurcissement et de désendurcissement entre cette partie de l'arbre et les branches plus basses sur lesquelles ont été réalisées les déterminations.

Un fonctionnement physiologique hivernal efficace

Un fonctionnement physiologique hivernal très efficace a également été mis en évidence, avec des capacités à maintenir la transpiration voire à photosynthétiser pour des températures très basses non gélives.

Enfin, une récupération des capacités de transpiration presque immédiatement après un cycle gel-dégel a pu être observée. Le suivi micro-dendrométrique renseigne parfaitement sur ce mécanisme de résistance au gel par évitement de la congélation, les cellules de l'écorce se déshydratent lors du gel en fonction de la température de la glace en formation dans le bois (Améglio et coll. 2001).

Ces cycles de gel-dégel sont supportés par l'espèce sans dommage apparent (Fig. 5) lorsqu'ils sont en deçà de la vulnérabilité déterminée avec le test de la fuite des électrolytes (LT50).

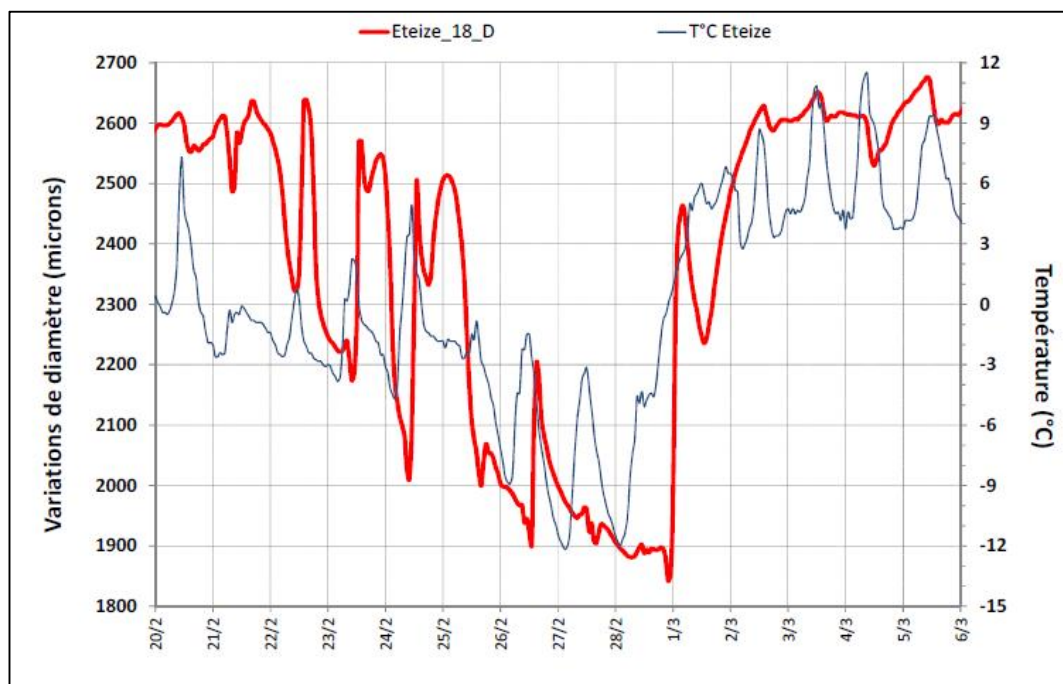


Fig. 5 : Variations du diamètre de l'arbre N°18 sur une période particulièrement gélive fin février à début mars 2018 sur le site d'Eteize et moyenne des températures de ce site, (Améglio et coll., 2018, annexe 1).

Sècheresse édaphique : grande tolérance et forte capacité de récupération

Le suivi en continu de la croissance en diamètre des arbres à l'aide du système PériPIAF a montré la grande tolérance à la sécheresse du cèdre qui supporte une sécheresse édaphique très contraignante sans régulation de sa transpiration et donc, on peut l'imaginer, de sa photosynthèse. L'espèce dispose par ailleurs de fortes capacités de récupération, dès que les conditions hydriques s'améliorent, ce qui démontre sa grande résilience au stress hydrique.

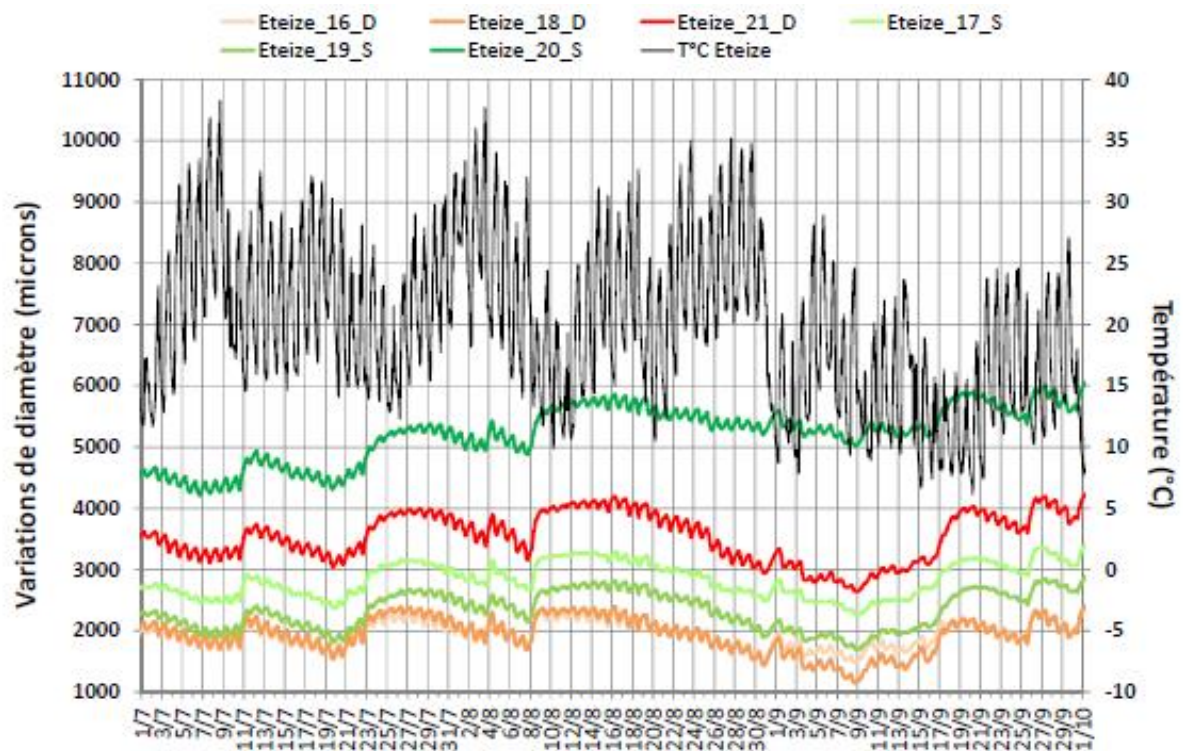


Fig. 6 : Variations du diamètre des arbres au cours de l'été 2017 sur le site d'Eteize et moyenne des températures de ce site (Améglio et coll., 2018, annexe 1)

Datation des anomalies de croissance

Abattage d'arbres et observations de tiges et rondelles de bois

Contributeurs : IDF-CNPF, CRPF-AURA et ONF, Phase 2

Afin de mieux comprendre les anomalies de croissance observées sur le bassin annonéen, des abattages et tronçonnages ont été organisés dans le but d'une part d'essayer de dater leur apparition voire, éventuellement à la relier à des évènements climatiques particuliers et d'autre part d'évaluer les conséquences de ces phénomènes sur la qualité du bois.

Les abattages se sont déroulés sur 2 sites à la fin de l'hiver, début 2018 :

- à St Marcel-lès-Annonay (à 6 km au nord-ouest d'Annonay) dans une plantation de cèdres installée en 1987 (30 ans lors des observations) à 620 m d'altitude et exposée au nord-est. Cette parcelle a fait l'objet d'un dépressage en avril 2018, opération qui nous a notamment permis de débiter 5 arbres en rondelles. Ils mesuraient de 7,15 à 12,5 mètre de hauteur, avaient des diamètres de 15 à 22 cm et présentaient différentes anomalies de croissance.
- à Roiffieux (à 4 km au sud-ouest d'Annonay) dans un peuplement mélangé de cèdres, pins sylvestre et douglas situé à 660 m d'altitude et exposé au sud. Seuls les cèdres présentent des cimes sèches. Les trois individus abattus avaient une soixantaine d'années, mesuraient de 20-25 m de hauteur pour des diamètres voisins de 40 de diamètre.

Abattage et tronçonnage à St Marcel lès Annonay

Dans le cas de l'arbre n°5 (12,5 m de haut et 22,3 cm de diamètre), qui présentait un facies de caniche, nous avons pu établir que la zone dépourvue de ramification (= le « cou » du caniche) correspondait à la pousse mise en place l'**année 2010** (Fig. 7). Cette datation a été faite à partir de la détermination des unités de croissance en partant de la pousse mise en place en 2017 et a été confirmée par le comptage des cernes (cf. en annexe 2, les unités architecturales du cèdre de l'Atlas).

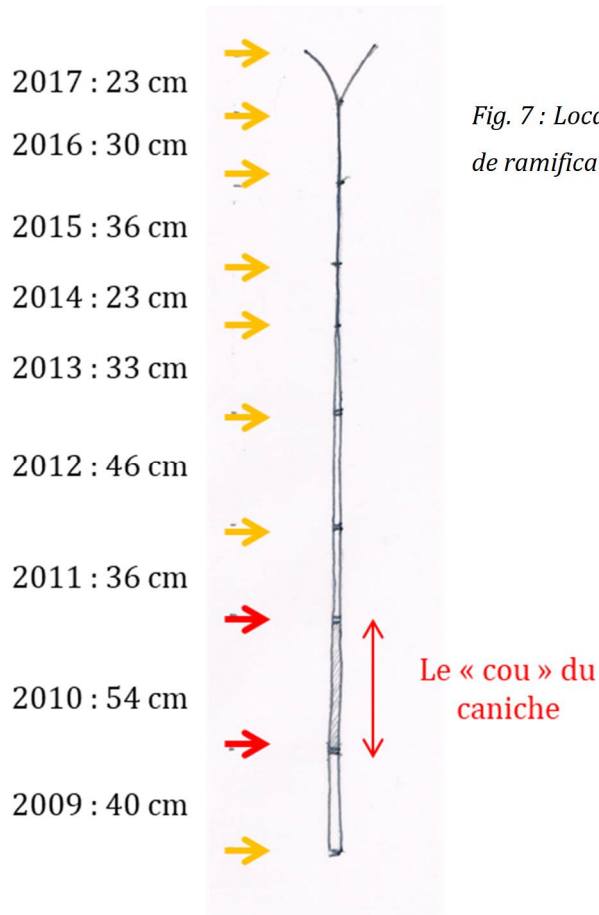


Fig. 7 : Localisation et datation de la partie de la zone dépourvue de ramifications sur l'arbre n°5 (photo S. Girard, CNPF, 2018).

La détermination de l'année de mise en place de la pousse qui a séché est plus délicate. Nous avons pu établir dans le cas des arbres n° 4 et 2 que les « relais » mis en place à partir d'un bourgeon latéral situé à la base de la cime sèche avaient 7 ans et se sont donc développés sur l'unité de croissance mise en place en 2010 (Photo 4).



Photo 4 : A la base de la cime sèche de 100 cm (flèche rouge), deux grosses branches ont pris le relais dont la branche fléchée en jaune qui a 7 années de croissance (arbre n°2, St Marcel). (S. Girard, CNPF, 2018).

L'arbre n°2 (7,15 m de haut et 15,4 cm de diamètre) présentait des décollements d'écorce au pied et jusqu'à environ 80 cm (photo 5) ainsi que des écoulements de résine sur 60 cm entre 1,80 m et 2,30m (photo 6). Des rondelles ont été prélevées au milieu de ces zones (photo 7).



Photo 5 : Décollement d'écorce sur l'arbre n°2, St Marcel (S. Girard, CNPF, 2018).

Photo 6 : Ecoulement de résine et méplat au niveau de l'écorce (arbre n°2, St Marcel, S. Girard, CNPF, 2018)



Photo 7 : Rondelle prélevée au niveau d'une zone du tronc avec des décollements d'écorce et un méplat. La flèche indique le cerne noir correspondant à l'année 2005 (St Marcel (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Nous avons néanmoins eu des difficultés à lire certaines rondelles de bois dans la mesure où il semble que le cèdre puisse présenter un certain nombre de « faux » cernes (M. Vennetier, comm. pers.).

Abattage et tronçonnage à Roiffieux (photos de J. Lemaire, CNPF, 2018)



Photo 8: Vue générale du peuplement mélangé concerné.

Photo 9 : Vue de la cime sèche d'un arbre abattu présentant une cime sèche.



Trois arbres d'une soixantaine d'année ont été abattus, deux avaient des cimes sèches et le troisième un port en caniche (photos 8 & 9).

Compte tenu de la présence de « faux » cernes, il n'a pas été possible de dater la pousse correspondant au « cou » du caniche.



Photos 10 & 11: Rondelle de bois prélevée sur le tronc au niveau de la zone présentant un décollement d'écorce (à gauche) et sur une branche du même arbre située au-dessous de la cime sèche (à droite). La branche mesure 8 cm de diamètre. Les flèches rouges signalent le cerne noir au-delà duquel on dénombre 12 cernes.

Conclusions : deux années identifiées comme problématiques : 2005 et 2010

Les cimes sèches observées chez les cèdres concernent toujours à plusieurs années de croissance ; elles atteignent d'ailleurs souvent plus de 1 mètre de longueur. Nous ne sommes pas parvenus à les dater en comptant les cernes des parties vivantes situées juste au-dessous du fait de la présence de « faux cernes ». Nous avons donc recherché l'âge des rameaux mis en place juste au-dessous de cette anomalie (les « relais » de cime) et, sur les trois individus examinés, nous avons déterminé que ces rameaux avaient 7 ans et qu'ils s'étaient donc développées sur la pousse de 2010.

Dans le cas des arbres présentant un « port en caniche », nous avons pu déterminer que c'était la pousse mise en place en 2010 qui était dépourvue de ramifications et de brachyblastes. Signalons qu'en mars 2010, -13.5 ° C était enregistré sous abri en zone de vigilance élevée (Fig.3 p 23).

L'abattage des arbres nous a également permis d'appréhender le phénomène de nécrose cambiale chez le cèdre que nous avons relié à l'année 2005, année où une vague de froid intense a touché la région le 1^{er} mars (-12°C sous abri à Roiffieux, -16.2 °C en zone de vigilance élevée) : le « Moscou-Paris ».

Les décollements d'écorce et la nécrose cambiale du cèdre : des problèmes sous-estimés ?

Ce phénomène concerne une forte proportion d'arbres mais le fait qu'il soit plus discret que les dessèchements de cimes, explique peut-être qu'il n'ait pas été ressenti par les forestiers de terrain comme problématique alors qu'il s'avère très impactant sur la qualité du bois (défaut rédhibitoire pour un débouché tel le parquet ; a priori seul un usage en poutre serait envisageable, J. Lemaire, comm. pers.).

Comme ces décollements d'écorce n'étaient pas le point focal de notre étude et leur ampleur ayant été appréhendée seulement à la fin du projet, le phénomène n'a pu être intégré au travail d'évaluation des risques. Le lien entre les décollements d'écorce et les défauts en cime n'a notamment pas pu être exploré de façon satisfaisante.

Rappelons néanmoins que lors de la première phase de l'étude, la présence d'anomalies de croissance dans le houppier était statistiquement corrélée ($p < 0.01$) à la longueur et l'intensité des écoulements de résine, écoulements dont on peut penser qu'ils sont très souvent (systématiquement ?) présents lors d'une gélivure.

Spatialisation des dégâts dans deux parcelles

Contributeur : IDF-CNPF, Phase 2

Les différentes observations faites dans les peuplements touchés par le phénomène de dessèchement de cimes laissaient penser que le phénomène n'était pas distribué de manière aléatoire dans les parcelles. Les plants en bordure de parcelles semblaient plus touchés que ceux au milieu, tout comme les hauts de versants et les expositions sud.

Afin de préciser ces observations, la distribution dans l'espace les différentes anomalies de croissance a été établie dans le cas de deux peuplements :

- à Eteize (à 8 km au nord d'Annonay) dans la parcelle de 2.31 ha instrumentalisée par l'INRA. Il s'agit d'une plantation réalisée en 1998 (19 ans lors des observations) à un écartement de 3,8 m x 4,1 m, positionnée en crête.
- à St Marcel-lès-Annonay (à 6 km au nord-ouest d'Annonay) dans une plantation de cèdres installée en 1987 (30 ans lors des observations) à 620 m d'altitude et exposée au nord-est. Cette parcelle présentait l'intérêt d'avoir fait l'objet d'observations en 2011 et 2016 ce qui permettait d'appréhender la réaction des arbres sur plusieurs années. Il s'agit de la parcelle qui a fait l'objet d'un dépressage et d'observations d'arbres abattus.

Plantation d'Eteize

Après avoir relevé les pourtours de la parcelle au GPS, chaque arbre de la parcelle a été positionné à partir de la photographie aérienne de l'IGN et le plan de parcelle a été recalé précisément sur SIG.

Chaque arbre a fait l'objet d'observations relatives à son état sanitaire (présence et longueur d'anomalies de croissance, déficit foliaire, décoloration foliaire), observations qui ont été reportées sur le plan (Fig. 8)



- ★ type 4 boule
- type 2 dessèchement partiel dit aussi type caiche
- type 1 sain
- ☆ type 3 cime seche

Fig. 8 : Etat sanitaire en mars 2017 de chaque arbre de la parcelle d'Eteize positionné sur la vue aérienne de la parcelle (source : IGN), (J. Lemaire & M. L'Huillier, CNPF, 2018)

Grace au modèle numérique de terrain (MNT) développée par l'IGN, l'exposition de la parcelle a été calculée à une résolution de 25 m (dimension d'un carré dans la figure 9).

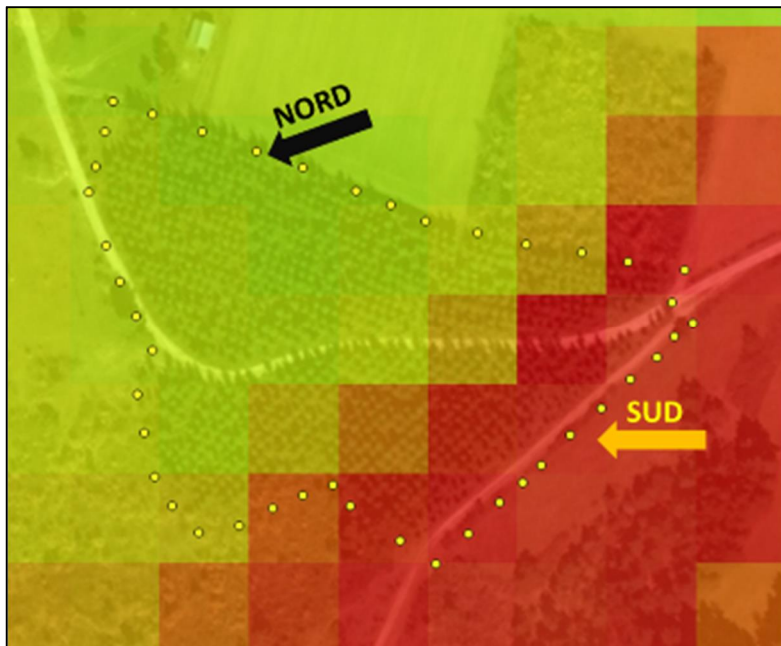


Fig. 9 : Variation de l'exposition dans la parcelle d'Eteize à une résolution de 25 m d'après le modèle numérique de terrain de l'IGN® (J. Lemaire, CNPF, 2018).

De la même façon, des modèles ont permis de calculer, pour chaque arbre, un indice de climat lumineux combinant sa position topographique et le rayonnement solaire qu'il reçoit (IKR), représenté sur la figure 10. Cet indice rend compte de l'énergie solaire effectivement reçue en un point donné : les valeurs supérieures à 1.05 indiquent des versants chauds et au-delà de 1.1 des versants très chauds (Ripert et Vennetier, 2002).



Fig. 10 : Variation de l'indice de climat lumineux (IKR) dans la parcelle d'Eteize à une résolution de 25 m (J. Lemaire, CNPF, 2018).

Enfin, la distance (en mètre) à la bordure de la parcelle la plus proche a également été estimée pour chaque arbre.

Différentes régressions de type C-PLS, des modèles logistiques et des arbres de segmentations ont ensuite été testés pour essayer d'expliquer la localisation des arbres touchés et non touchés au sein de la parcelle. Le modèle logistique de type forward (cf. détails en annexe 3) a été retenu car plus efficient, il fait ressortir un impact statistiquement significatif de **l'indice de climat lumineux** et de la **distance par rapport à la bordure de la parcelle**.

A partir de ce modèle, une carte de probabilité de présence d'anomalies (toutes catégories confondues) a été tracée avec une résolution de 25 m (fond de la figure 11).

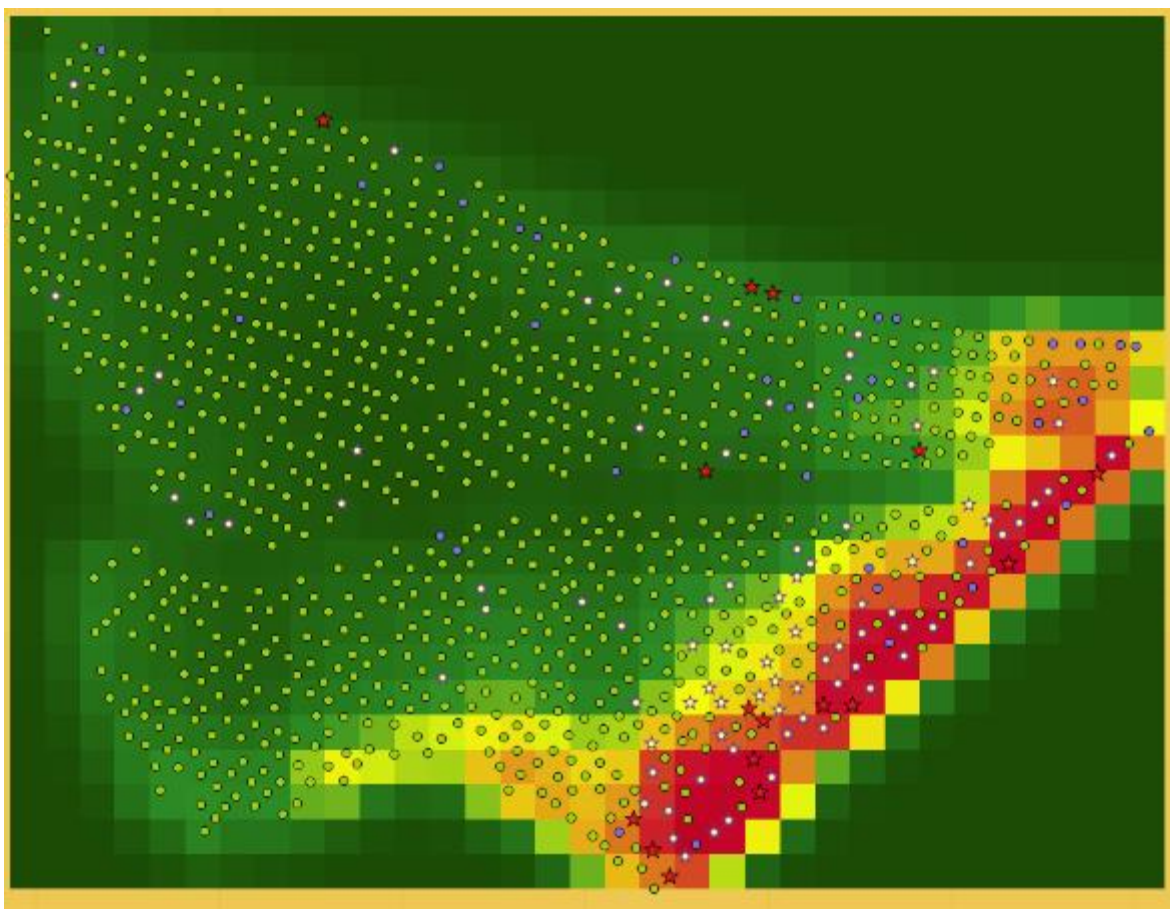
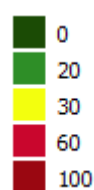


Fig.11 : Carte de probabilité de présence d'une anomalie de croissance sur la parcelle d'Eteize (fond) superposée aux dégâts réellement constatés sur les plants (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Probabilité de présence
d'une cime anormale %
modèle logistique :



- ★ type 4 boule
- type 2 dessèchement partiel dit aussi type caiche
- type 1 sain
- ☆ type 3 cime sèche

Interprétation

Selon le modèle logistique plus l'indice de climat lumineux est élevé c'est à dire plus un arbre est exposé au sud et sur une zone en pente, plus la probabilité qu'il soit affecté par une anomalie de croissance est élevée. Plus l'arbre est éloigné de la bordure de la parcelle plus la probabilité qu'il soit touché est faible. Ces deux effets se contrecarrent mettant en évidence un problème thermique. **Les arbres les plus touchés se situent en bordure de parcelle et en versant chaud exposé au sud ou à l'ouest.**

Plantation de St Marcel lès Annonay

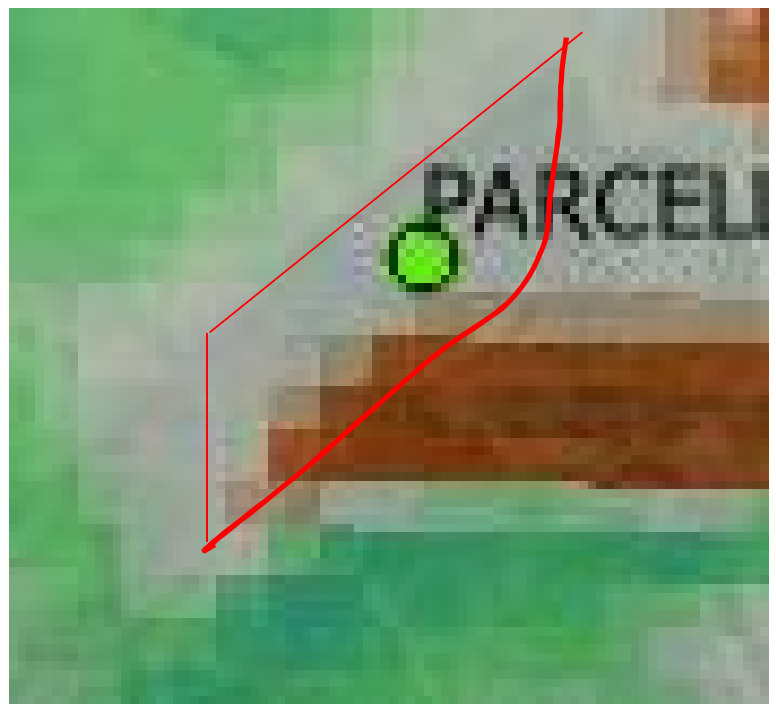
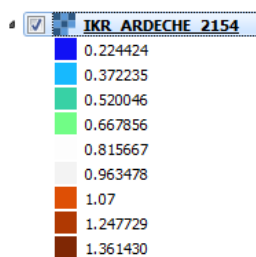
Cette parcelle de 1.45 ha se trouve en milieu d'un versant orienté NE à 620 m d'altitude. La partie supérieure du versant est occupée par une plantation de pins laricio de Corse installés la même année que les cèdres en 1987. La parcelle de cèdre est bordée au nord par une prairie ; les arbres de bordures sont de ce fait particulièrement exposés aux vents froids (Photo 12). Elle a notamment subi des vents forts lors de la tempête de décembre 1999 sans dégâts apparent.

Les plants (1-0G WM, étiquette bleue) ont été installés à une densité de 1 100 plants/ha (écartement de 3 x 3m) après un sous-solage, ils n'ont subi aucun entretien les premières années. Un élagage de pénétration jusqu'à 2 mètres a été effectué sur tous les arbres en 2002 en même temps qu'un premier dépressage soit 15 ans après plantation (densité ramenée à 850 tiges/ha).



Photo 12 : Vue aérienne de la parcelle de St Marcel lès Annonay (source : Géoportail, 2017),

Fig. 12 : Variation de l'indice de climat lumineux (IKR) dans la parcelle de St Marcel lès Annonay à une résolution de 25 m (J. Lemaire, CNPF, 2018).



Pour mémoire, cet indice rend compte de l'énergie solaire effectivement reçue en un point donné : les valeurs supérieures à 1.05 indiquent des versants chauds et au-delà de 1.1 des versants très chauds (Ripert et Venetier, 2002).

Dessèchements de cimes en mars 2011 :

Des dégâts en cime ont été signalés en 2010. L'année suivante le CRPF a marqué les arbres atteints par un point de peinture bleu sur le tronc et dressé un premier état des lieux : **71 %** des plants sont jugés sains, **2 %** sont secs et **27 % « atteints »**¹⁰ soit 331 sur 1228.

Comme les points de peinture désignant les arbres repérés à cette époque étaient encore visibles en 2018, nous avons pu localiser les dégâts sur plan (Fig.13). Sur 1195 arbres toujours vivants en 2018, 251 soit **21 %** étaient marqués et avaient donc présenté une cime desséchée **en mars 2011**. Le quart sud-est de la parcelle semblait la zone la plus touchée.

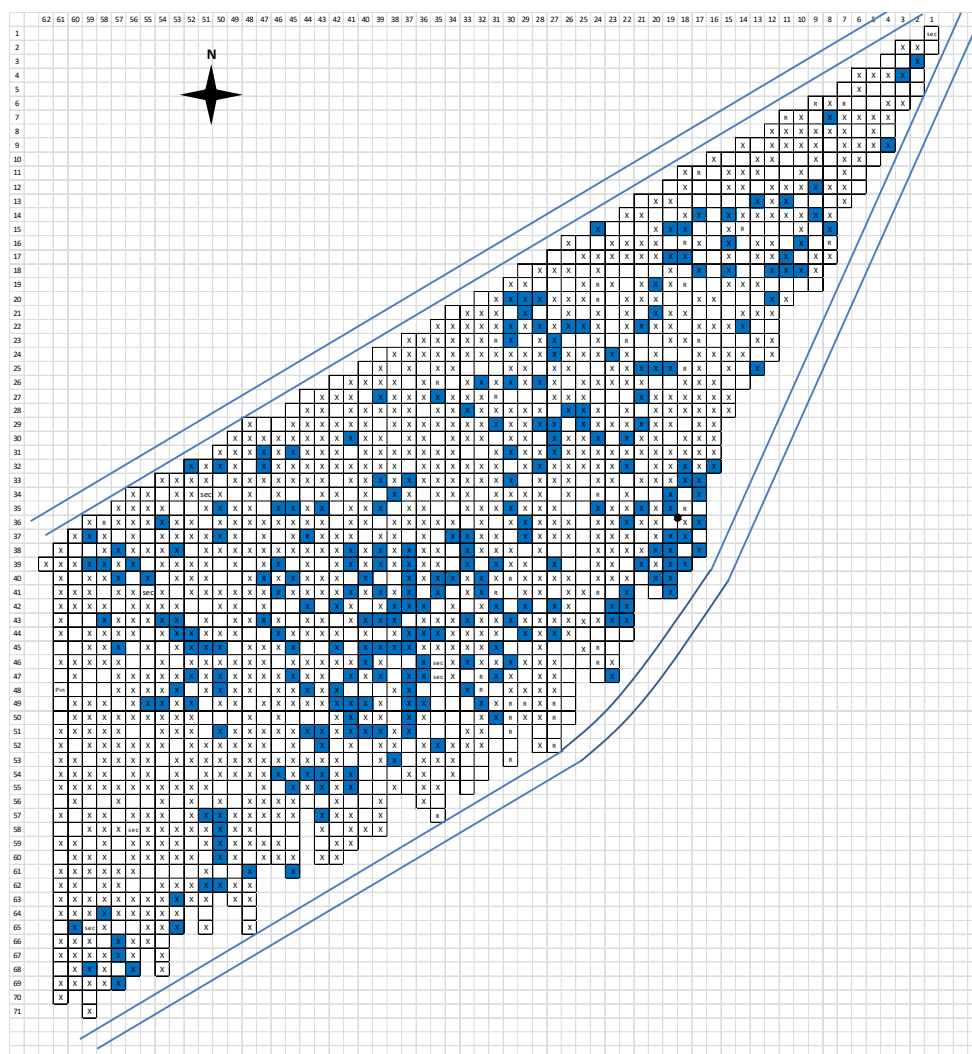


Fig.13 : Localisation des 251 arbres (points bleus) présentant une cime sèche en mars 2011 et toujours vivants en 2018 (S. Girard, CNPF, 2018).

¹⁰ Les arbres atteints correspondent à des arbres ayant des dessèchements dans la partie supérieure du houppier et/ou des écoulements de résine.

Dessèchement de cimes en juin 2016 :

Cinq ans plus tard, en juin 2016, un autre marquage (point de peinture orange) a été réalisé par les mêmes opérateurs (Fig. 14). Les arbres atteints en 2011 et en 2016 portaient donc un double marquage lors des observations en 2018 (ils sont en bleu/orange sur la figure 13).

En juin 2016, 333 arbres soit **28 %** des plants toujours vivants en 2018 présentaient des dessèchements dans leur houppier parmi lesquels environ 40 % étaient déjà atteints en 2011. La moitié des plants atteints en 2011 ne présentait a priori plus de symptômes visibles cinq ans après. Les dégâts étaient relativement dispersés dans la parcelle, la bordure Est- en contrebas de la plantation de pins laricio- semblait épargnée ainsi que la bordure nord tandis que la zone Sud-Est était la plus touchée.

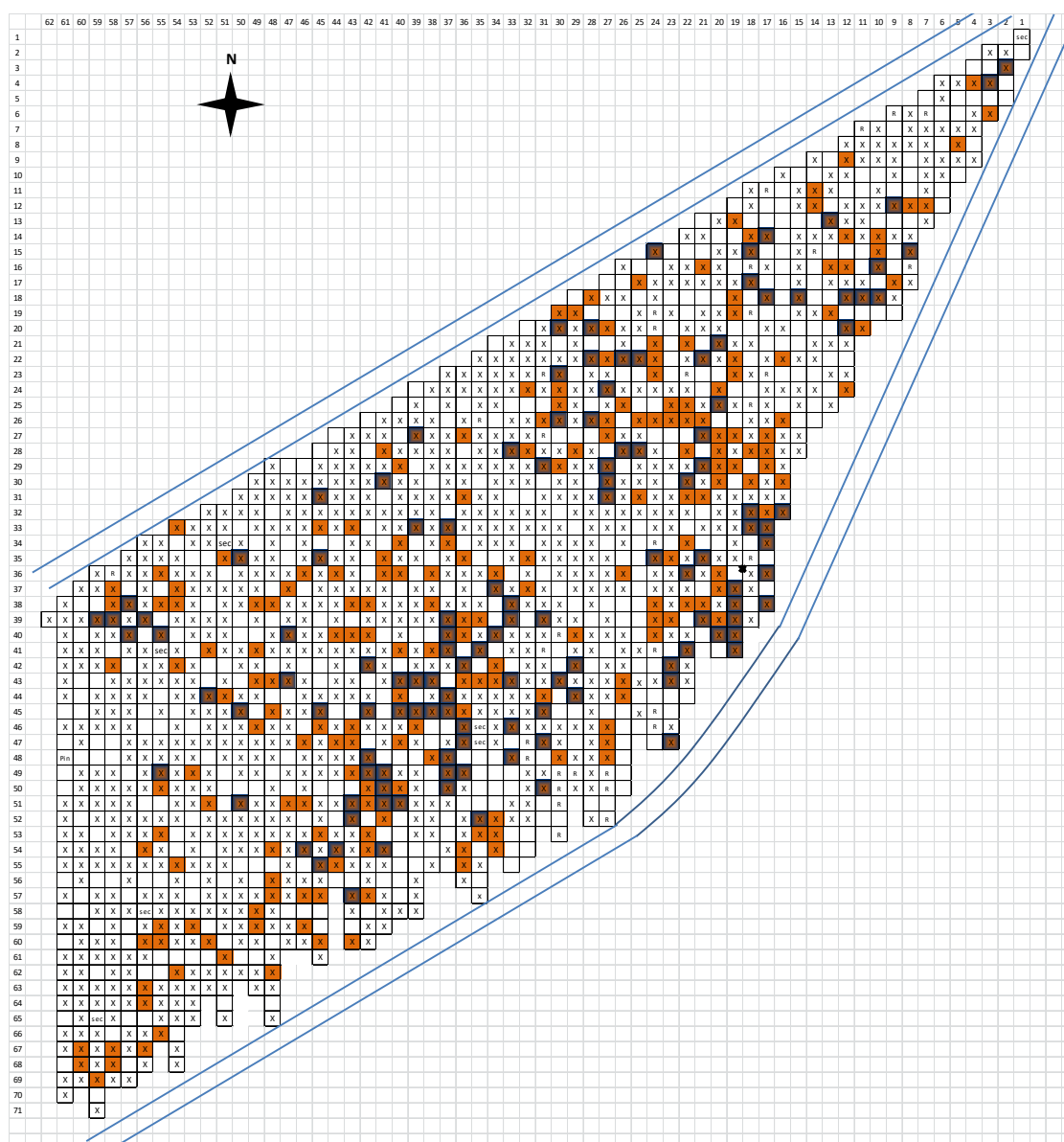


Fig.14 : Localisation des 333 arbres présentant une cime sèche en juin 2016 et toujours vivants en 2018 (en bleu/orange ceux déjà touchés en 2011, en orange ceux diagnostiqués seulement en 2016) (S. Girard, CNPF, 2018).

Observations des houppiers en mars 2018 :

Au printemps 2018, la plupart des arbres ont plus de 12 mètres de hauteur et l'observation de la partie supérieure de leur houppier est parfois difficile.

Des **anciennes cimes sèches** sont toujours visibles sur une partie des individus (144 soit **12 %** des arbres vivants). Leur longueur est souvent supérieure à 80 cm. Dans de nombreux cas, la dominance apicale a été restaurée. En général, de nombreuses ramifications sont présentes à la base de l'ancienne cime desséchée (photo 13).

Photo 13 : Cime desséchée depuis plusieurs années (de 120 cm environ). Deux nouvelles branches se sont développées à la verticale et de nombreuses autres à la base de la cime sèche (S. Girard, CNPF, 2018).



Par ailleurs, chez 83 individus soit **7 %**, des zones du tronc dépourvues de ramifications et d'aiguilles (le « cou » du **caniche**).



Il s'avère que 149 individus soit **12.5 %** ont les **extrémités de certaines branches latérales sèches**, cela ne concerne généralement pas l'ensemble du houppier mais un certain niveau à une hauteur néanmoins variable selon les individus (photo 14, en orange sur la figure 14). Notons que le phénomène peut également être présent combiné à une cime sèche plus ou moins ancienne ou à un facies « caniche ».

Photo 14: Arbre ayant conservé sa dominance apicale mais présentant de nombreuses extrémités de rameaux latéraux desséchés. (S. Girard, CNPF, 2018)

Au total, en mars 2018, 31 % des arbres présentent des anomalies de croissance dans leur houppier (cimes sèches, facies « caniche » ou dessèchement de rameaux latéraux). Les arbres touchés sont répartis sur l'ensemble de la parcelle exception faite de la bordure ouest.

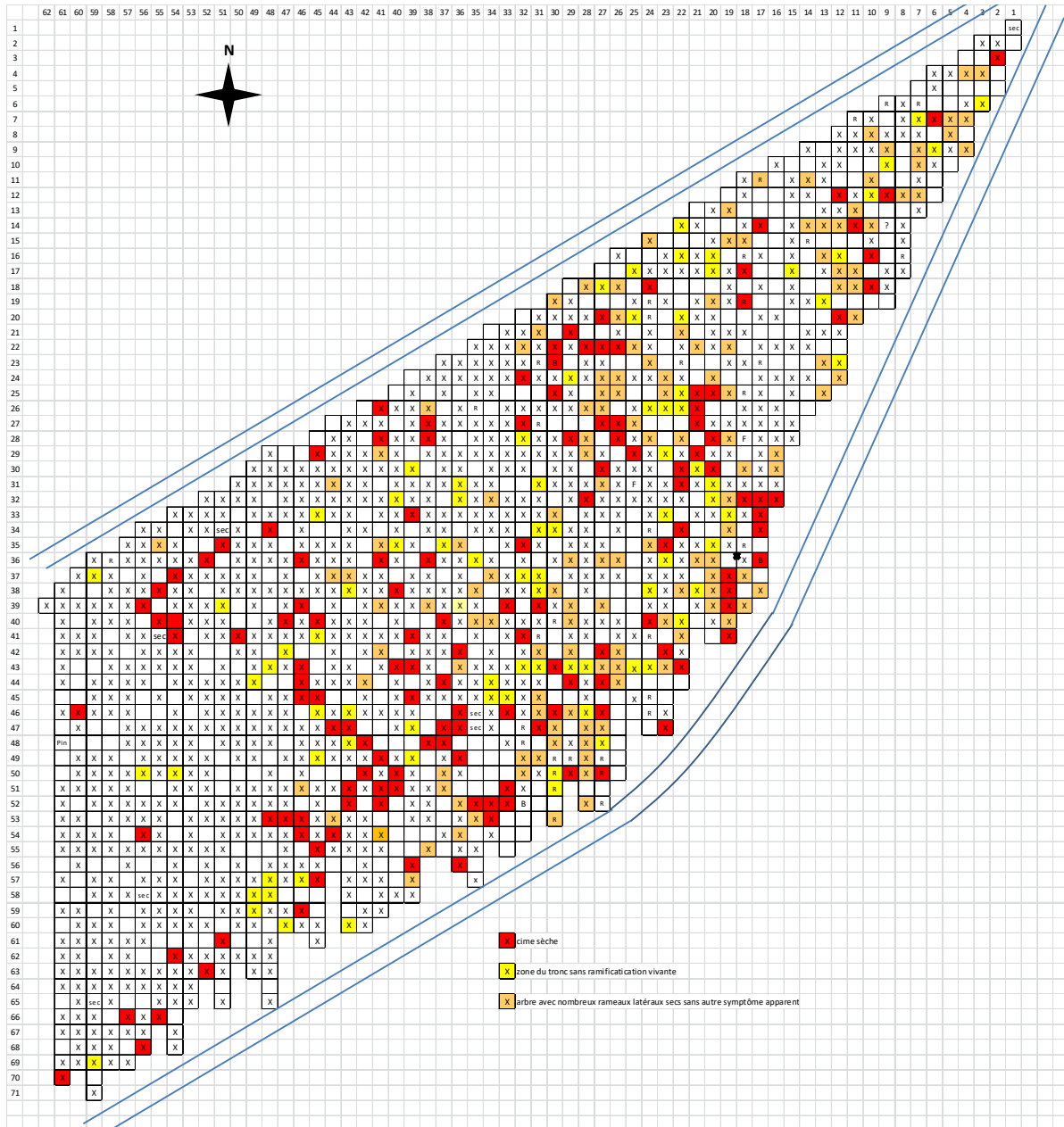


Fig.15 : Localisation des 376 arbres présentant une anomalie de croissance en mars 2018 (en rouge : cime sèche ancienne ; en jaune : facies caniche ; en orange : présence de rameaux latéraux desséchés) (S. Girard, CNPF, 2018).

Malgré le fait que les observations n'aient pas été faites avec les mêmes protocoles en 2011, 2016 et 2018, le travail réalisé sur cette parcelle permet d'établir les éléments suivants :

Au niveau temporel : Certains arbres diagnostiqués comme « dépérissants en cime » en 2011 se sont « refaits » et il était difficile de retrouver en 2018 trace du dysfonctionnement noté à l'époque. Pour d'autres, les cimes sèches sont encore présentes et on peut observer la mise en place d'un ou plusieurs nouveaux axes verticaux. Le facies caniche ne semble pas évoluer (pas d'apparition de ramification sur la zone du « cou ») même si on remarque dans certains cas en 2018 que des petits rameaux situés aux deux extrémités se sont desséchés.

Au niveau spatial : il semble que les dessèchements des parties sommitales des arbres soient d'abord apparus dans le ¼ SE de la parcelle et pas en bordure nord, pourtant particulièrement exposée aux vents froids. L'extrême ouest de la parcelle est quasi indemne d'anomalies de croissance. Ces observations sont très bien corrélées à l'indice de climat lumineux de la parcelle : les dégâts sont d'abord apparus dans les zones recevant l'énergie lumineuse la plus forte (Fig.12 & 13).

Suivis du débourrement 2018

Contributeurs : IDF-CNPF, CRPF-AURA, Phase 2

Lors de la phase 1 de l'étude, des suivis photographiques avaient été réalisés dans une parcelle située à St Alban d'Ay (à 9 km au SE d'Annonay). Une décoloration importante des aiguilles des cèdres en mars et avril 2014 avait été observée.

Afin de préciser si ces décolorations avaient un quelconque lien avec les anomalies de croissance, 8 arbres ont fait l'objet d'un suivi photographique sur la parcelle d'Eteize de mars à juin 2018.

Par ailleurs, fin février et début mars 2018, la France a été soumise à une période de froid intense (phénomène météorologique connu sous le nom de « Moscou Paris »¹¹). Comme ce type d'évènement pouvait présenter des risques pour le cèdre selon une de nos hypothèses de travail, un suivi photo a également été organisé sur deux autres sites : l'un à Saint Laurent du Pape (45 km au sud d'Annonay, 143 m d'altitude) et l'autre à Mours Saint Eusèbe (45 km au sud-est d'Annonay, 185 m d'altitude).

Site d'Eteize (l'ensemble du suivi photographique se trouve en annexe 3)

Les huit arbres qui ont fait l'objet d'un suivi photographique ont été choisis pour moitié sur la bordure sud-est de la parcelle –zone particulièrement exposée au risque d'anomalies de croissance d'après les résultats de J. Lemaire (arbres n°1 à 4)- et au bord du chemin central –zone confinée, au risque minimal (arbre n°5 à 8). Les arbres n°1 et 6 ont un faciès « caniche », les n°2, 3 et 5, une cime sèche, le n°4, un « port en boule », les 7 et 8 sont des arbres sans anomalie. Sur chacun de ces arbres un rameau situé entre 1,50 et 2 m de hauteur a fait l'objet d'un suivi photographique du 3 mars au 20 juin 2018 : les 2 et 25 mars, le 28 avril et le 18 juin.

En plus des aiguilles disposées en bouquets (sur des rameaux courts), les échantillons observés disposent d'aiguilles insérées le long de la pousse longue. Néanmoins, seuls trois échantillons (arbres n°2, 5 et 8) ont des aiguilles sur les rameaux longs de 2 années (2017 et 2016), seule la pousse 2017 possède ce type d'aiguilles sur les autres échantillons. Le détail du suivi pour chaque arbre se trouve en annexe 2. Nous n'avons observé aucune différence dans la cinétique de débourrement des huit arbres observés : les nouvelles aiguilles ont émergé des bourgeons à la fin du mois d'avril et étaient visibles sur tous les échantillons le 28 avril.

¹¹ Il s'agit d'un courant d'air froid lié à la présence d'un anticyclone sur le nord de l'Atlantique et la Scandinavie qui ramène de l'air très froid de Sibérie. Les basses températures qui lui sont liées s'accompagnent de vent qui accentue le froid ressenti.

Les aiguilles en place sur les différents rameaux observés n'ont montré aucun signe d'altération juste après l'épisode froid de fin février (-12°C enregistré les 27 et 28 février par les PépiPiaf de l'INRA sur les arbres instrumentalisés de la parcelle, cf. Fig. 6 et annexe 1) : aucune décoloration ni chute anormale d'aiguilles n'est visible entre les 3 et 25 mars.

En revanche, de nombreuses aiguilles jaunissent au cours du mois d'avril, qu'elles soient insérées directement sur la tige ou bien regroupées en bouquets (brachyblastes), au point que le houppier de certains arbres prend une teinte franchement dorée (Photo 15).



Photos 15 & 16 : Jaunissement du houppier d'un arbre sain à Eteize le 28 avril 2018 accompagné d'une chute importante d'aiguilles (S. Girard, CNPF, 2018).



Ce jaunissement est concomitant de l'ouverture des bourgeons des rameaux courts (c'est-à-dire au niveau des bouquets d'aiguilles) et des rameaux longs (Photo 17).

Photo 17 : Etat du rameau de l'arbre n° 5 le 28 avril 2018 : jaunissement puis chute d'aiguilles et apparition des nouvelles aiguilles (S. Girard, CNPF, 2018).



Après avoir jaunies, les aiguilles tombent. Après débourrement, le rameau photographié présente une densité d'aiguilles nettement augmentée.



Photo 18 : Etat du rameau de l'arbre n° 5 le 18 juin 2018 : nouvelles pousses en croissance (S. Girard, CNPF, 2018).

Site de St Laurent du Pape (photos en annexe 4) :

Le 27 février, au petit matin, la température a atteint - 8 °C sous abri¹² (-14 °C réellement mesuré) sur le premier site et - 9°C sur le second. A partir de la deuxième quinzaine du mois de mars et jusqu'à fin avril, une partie des aiguilles du rameau observé jaunit et tombe. Le débourrement survient début mai et, mi-mai la nouvelle pousse est en élongation.

Site de Mours St Eusèbe (photos en annexe 5) :

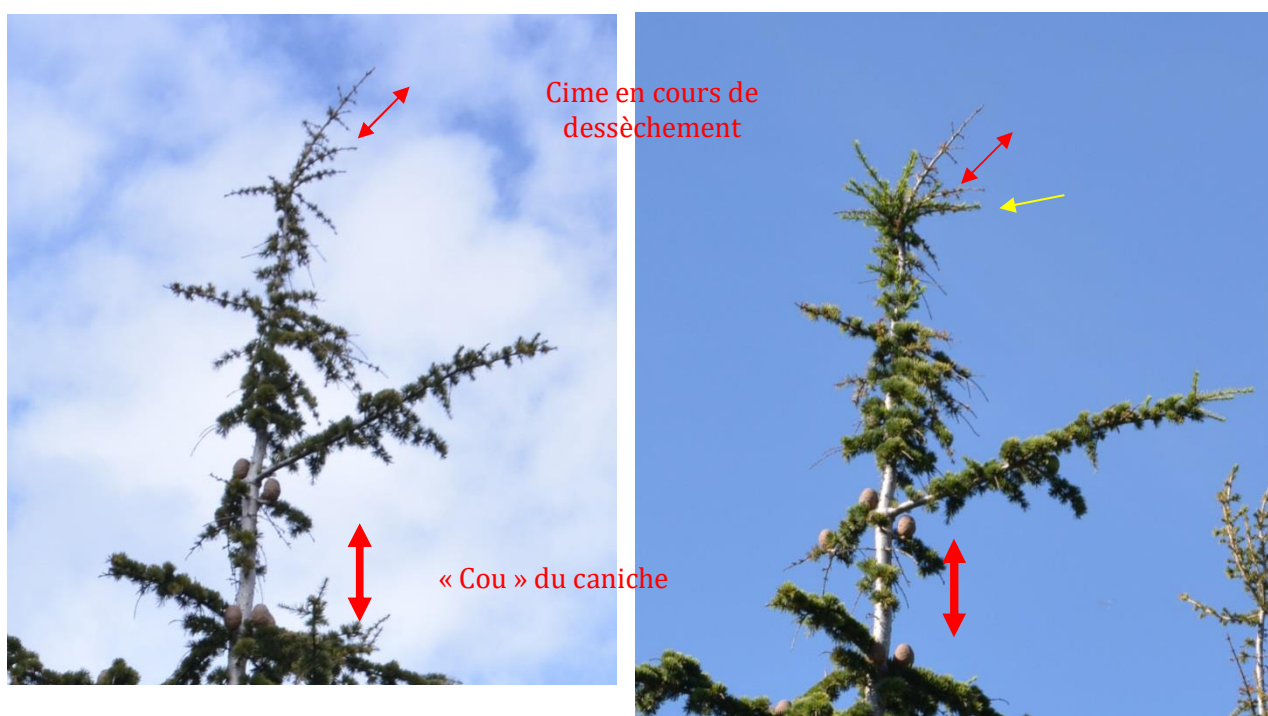
Température calculée¹² le 27/202/18 à 6h -9°C sous abri, Température mesurée : -14 °C. L'évolution est identique à celle observée à St Laurent : jaunissement des aiguilles en mars et avril et chute des aiguilles jaunes début avril (très peu d'aiguilles présentes le 4 avril). Les bourgeons des rameaux courts débourrent fin avril/début mai et de nouvelles aiguilles regroupées en bouquet émergent. L'élongation de la nouvelle pousse est visible le 29/05/18.

¹² Données calculées par le modèle AROME de Météo France

En conclusion : les observations faites en 2018 suite à l'épisode météorologique « Moscou-Paris » du 27 février montrent que les cèdres perdent une partie importante de leurs vieilles aiguilles juste avant l'apparition des nouvelles et cela indépendamment de l'état sanitaire de leur houppier. La chute des aiguilles à cette période est connue (cf. par exemple Dupont¹³) et nous ne sommes pas en mesure d'établir avec certitude que le coup de froid survenu les 27 & 28 février 2018 a entraîné une perte plus importante et/ou plus précoce d'aiguilles.

Quoiqu'il en soit, cet épisode ne semble pas avoir eu de conséquence sur le débourrement des branches basses qui ont fait l'objet d'un suivi à Eteize : tous les bourgeons de l'ensemble des 8 rameaux observés ont débourré simultanément.

Néanmoins, on peut s'interroger sur les conséquences de cet épisode sur la partie sommitale des arbres, partie qui ne faisait pas l'objet de suivi. En effet, dans le cas de l'arbre n°2 présentant un « port en caniche » et dont un rameau faisait l'objet d'un suivi photographique à Eteize, nous avons observé au cours du printemps le dessèchement de la cime de l'arbre et l'apparition de rameaux « relais » à la base de la partie en cours de dessèchement (photos 19 &20)...



Photos 19 & 20: Cime de l'arbre n° 2 le 25 mars 2018 (à gauche) et le 18 juin 2018 (à droite) : (S. Girard, CNPF, 2018).

¹³ <https://sites.google.com/site/dupontpepinieres/conseils/coniferes/lorsque-les-sapins-perdent-leurs-aiguilles>

Des symptômes liés à une carence en bore ?

Contributeur : IDF-CNPF, Phase 2

Comme la piste d'un déséquilibre de l'alimentation minérale et notamment d'une carence en bore n'avait pas été explorée dans la première phase du projet, des analyses minérales de sols et d'aiguilles ont été effectuées sur trois sites afin de poser le diagnostic.

Les sites :

Ils se situent dans la partie nord du département de l'Ardèche, à 5/10 km au nord de la ville d'Annonay, sur des sols acides avec de fortes charges en cailloux. La végétation au sol est un couvert continu et uniforme de mousse (hypne, photo 21), quelques églantiers et chênes pubescents sont présents de façon éparse.



Photo 21 : Tapis de mousses couvrant le sol du peuplement de St Marcel (S. Girard, CNPF, 2018)

Commune	Altitude	Substrat géologique¹⁴	Texture dominante¹⁵
Savas/ Eteize	665 m	Granite calco-alcalin à biotite et cordiérite	LS jusqu'à 30 cm
St Marcel-lès-Annonay	600 m	Formation métamorphique : Micaschistes et gneiss fins	LS jusqu'à 50 cm
St Clair	515 m	Formation métamorphique : anatexite sombre à cordiérite et/ou sillimanite	SL jusqu'à 25 puis LS

¹⁴ Source : Carte géologique harmonisée du département de l'Ardèche, 2009 : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57097-FR.pdf> consulté en janvier 2018.

¹⁵ D'après les descriptions de fosse pédologiques réalisées lors de l'étude par Christophe Vidal (CNPF).

Analyses de sol :

En préalable aux prélèvements de sol pour analyses minérales, une fosse pédologique a été réalisée et décrite sur chacun des 3 sites concernés. Les prélèvements pour analyses ont eu lieu en janvier 2017 à raison de deux échantillons par site : un à 5-10 cm de profondeur, un autre à 30-40 cm. Chaque échantillon est constitué du mélange pondéré de dix prélèvements effectués à des emplacements différents dans la parcelle (2 grappes de 5 grains). Au total 6 échantillons ont été analysés par le laboratoire Teyssier (26460 Bourdeaux).

Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

		Texture	pH eau	N tot	P	K	Mg	Ca	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B	MO	Tx saturation	CEC
				mg/kg MS											%	meq/100 g	
St Marcel	5-10 cm	Lsa	5,20	1998	82	120	356	1040	24	109,8	1,2	3,1	28,1	0,37	3,8	41	14,1
	30-40 cm	Sal	5,20	1306	60	96	202	537	25	78	1,2	1,7	17,7	0,27	2,6	26	12,3
Savas/ Eteize	5-10 cm	SL	4,8	1790	51	54	180	644	24	99,3	0,6	2,9	26,4	0,37	4,27	32	10,7
	30-40 cm	S	4,9	1644	39	26	143	742	26	74,6	0,6	2,1	22,1	0,31	4,09	27	12,8
St Clair	5-10 cm	SL	4,3	1866	313	26	48	274	21	147,4	0,5	2,8	1,4	0,34	4,98	12	11,3
	30-40 cm	SL	4,7	1319	507	48	32	227	20	63,6	0,5	1,4	1,1	0,35	3,8	12	10,2

Tab.1 : Résultats des analyses de sol réalisées à 5-10 cm et 30/40 cm de profondeur sur les 3 sites étudiés.

Les teneurs en bore dans les 3 sites sont identiques : en moyenne **0.36 mg/kg** dans les premiers centimètres et **0.31 mg/kg** à 30-40 cm de profondeur.

A titre de comparaison, voici les résultats des analyses publiées par Legrand (2003 et 2006) :

- St Julien au Bois (19) : **0,118 mg/kg** à 5/10 cm, **0,083 mg/kg** à 30/40 cm ;
- Voldamet (43): **0,14 mg/kg** à 5 cm **0,04 mg/kg** à 30 cm ;
- Pié-Fouilloux (43) : **0,17 mg/kg** à 5 cm **0,11 mg/kg** à 30 cm.
- sites ardéchois¹⁶ : **0,12 à 0,68 mg/kg** **0,06 à 0,18 mg/kg**

¹⁶ Source : Normand, DSF Sud-Est, communication personnelle cité par Legrand, 2006. N.B : Sites non identifiés dans la publication.

Les teneurs en bore dans les 3 sites ardéchois sont cohérentes avec les résultats des précédentes analyses réalisées dans le département et auxquelles fait allusion Normand¹⁶. Elles sont **3 fois supérieures** à celles des sites où des carences foliaires ont été diagnostiquées.

Analyses foliaires :

Sur chaque site, des prélèvements ont été effectués sur 10 arbres ayant le même état sanitaire (sain ou avec une cime sèche). Sur chaque arbre, plusieurs rameaux situés dans le tiers supérieur du houppier ont été coupés à l'échenilloir en janvier 2017 selon le protocole du Département Santé des Forêt (Manuel du correspondant-observateur, édition du 09/99).

Les aiguilles de l'année 2016 des 10 arbres de même statut sanitaire ont été détachées et mélangées dans les mêmes proportions pour constituer un seul échantillon. Précisons qu'un seul échantillon d'aiguilles a été récolté sur le site de St Clair, sur des arbres sains, dans la mesure où ce site était dépourvu d'arbres symptomatiques.

Au total 5 échantillons ont été analysés par le laboratoire Teyssier (26460 Bourdeaux). Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

		% du poids sec							en mg/kg MS				
		C	N	C/N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
St Marcel	Sain	43,21	1,090	35,5	0,105	0,643	1,011	0,168	20,4	6,4	22,4	987,6	22,3
	Dépérissant	43,80	1,068	36,0	0,109	0,601	0,893	0,154	22	10	19,6	1087	22,2
Savas/ Eteize	Sain	43,98	1,376	36	0,111	0,54	0,631	0,174	20	5,7	20,6	1159	21,5
	Dépérissant	42,6	1,12	35,9	0,096	0,535	0,82	0,179	32,6	5,4	21	992,3	20
St Clair	Sain	43,81	1,297	36,1	0,122	0,627	0,776	0,19	36	9,9	18,7	245,4	20,4

Tab.2 : Résultats des analyses foliaires réalisées sur des arbres sains et des arbres présentant un dessèchement de cime dans les 3 sites étudiés.

Les teneurs en bore dans les aiguilles sont quasiment identiques sur les 3 sites: **21 mg/kg** en moyenne. Les arbres sains ont les mêmes teneurs que ceux ayant une cime desséchée.

A titre de comparaison, le tableau ci-après rassemble les éléments trouvés dans la bibliographie.

Tab.3 : Synthèse des résultats des dosages du bore dans les aiguilles de cèdre de l'Atlas. Les termes « carencés » et « maladifs » correspondent à des arbres au port en boule. Les sources sont indiquées dans le tableau.

Localisation	B (mg/kg M.S)	Source	Date de l'échantillonnage
St Laurent du Pape (07), carencés	1	Bonneau (2002)	déc. 1999 ?
Geniès en Coiron (07), sains	16	Bonneau (2002)	déc. 1999 ?
St Geniès en Coiron (07), carencés	4,3	Bonneau (2002)	déc. 1999 ?
Forêt des Ecrivains Combattants (34), sains	6	Bonneau (2002)	?
Forêt des Ecrivains Combattants (34), carencés	1	Bonneau (2002)	?
Voldamet (43), témoins	2,63	Legrand (2003)	déc. 2000
Voldamet (43), carencés	> 1	Legrand (2003)	déc. 2000
Pié-Fouilloux (43), témoins	> 1	Legrand (2003)	déc. 2000
Pié-Fouilloux (43), carencés	> 1	Legrand (2003)	déc. 2000
St Julien aux Bois (19), témoins	3,84 ± 0,19	Legrand (2006)	déc. 2003
St Julien aux Bois (19), maladifs	1,59 ± 0,079	Legrand (2006)	déc. 2003
Sites ardéchois (?) sains ¹⁷	5,8 et 17,2	Normand in Legrand 2006	
Sites ardéchois (?) carencés ¹⁷	6,9 et 15,1	Normand in Legrand 2006	

Bonneau (2002) indique qu'en terme de composition minérale foliaire, le Cèdre de l'Atlas est peu différent des résineux tempérés tels que l'Epicéa commun, le Pin sylvestre ou le Douglas. Le tableau 4 donne les teneurs optimales selon cet auteur pour des cèdres âgés d'une dizaine d'années :

Tab. 4 : Optimum de composition minérale foliaire pour le cèdre de l'Atlas selon Bonneau (2002)

N	13 à 14	mg/g de M.S.
P	1,2 à 1,3	
K	7,0 à 7,5	
Ca	environ 9	
Mg	1,5 à 1,6	
Mn	300 à 600	mg/kg de M.S.
Fe	100 à 200	
Zn	20 à 25	
Cu	4 à 5	
B	16 à 20	

Ces éléments conduisent à considérer les 3 sites comme fortement carencés en Fer, avec une légère déficience en potassium et en phosphore (exception faite pour P sur le site de St Clair où le contenu azoté des aiguilles est également le plus favorable).

D'après les éléments disponibles à ce jour, **aucun des sites étudiés ne présente de carence en bore.**

Suivi de l'impact d'un dépressage en régénération naturelle

Contributeurs : IDF-CNPF et ONF, Phase 2

Sur la forêt du Mont Miandon, des anomalies de croissance ont été détectées au début des années 2000 (? à confirmer par J.S) dans des parcelles issues de la régénération naturelle de cèdres plantés dans le secteur. Du fait de l'impact paysager que pose le phénomène dans cette zone très fréquentée du public et visible depuis le centre urbain (cf. carte 5), la ville d'Annonay, -propriétaire d'une grande partie de cette forêt- a décidé de mener une opération expérimentale. Ainsi, en 2013, un nettoyage et un dépressage ont été réalisés sur environ 1 hectare. Bien qu'aucun état des lieux initial n'ait pu être réalisé avant l'opération il nous est apparu important de mettre en place un suivi, notamment au plan sanitaire, pour pouvoir appréhender objectivement ses conséquences. Réaliser un dépressage dans les régénérations présentant des anomalies de croissance est en effet un des rares « leviers » dont dispose le forestier pour agir.

Description de la parcelle étudiée :

La parcelle étudiée se trouve à 550 m d'altitude, elle est exposée SE en milieu de versant avec une pente de 38 %. Le substrat géologique est de l'anatexite claire à cordiérites.



Carte 5 : localisation de la parcelle étudiée (source : www.geoportail.gouv.fr)

Les travaux de nettoyage/dépressage ont été réalisés par l'Office National des Forêts fin novembre 2013. Le bilan de l'opération (ONF 2014) précise que les arbres présents mesuraient de 3 à 6 m de hauteur, que les cèdres « dépérissants et de mauvaise venue » ont été coupés prioritairement ainsi que les essences accessoires cassées ou dépérissantes qui gênaient la régénération du cèdre.

Description de l'opération de dépressage effectuée en novembre 2013

Au départ les semis, très serrés, étaient situés à 1m voire moins les uns des autres. L'opération a consisté en un **nettoiemnt** de la parcelle (élimination des arbres en mauvais état sanitaire ou gênant de développement d'arbres d'avenir) à associer à un **dépressage en plein** sur l'ensemble du périmètre défini. Un espacement de 3 x 3 mètres a été créé, soit une densité finale recherchée de 1 100 arbres à l'hectare.

Observations et mesures effectuées les 17 & 18 avril 2017

Installation côte à côte de deux placettes de 20 x 20 m : une dans la zone dépressée en 2013 et l'autre dans la zone non dépressée. N.B : il était initialement prévu d'installer deux autres « couples » de ce type mais une surface insuffisante et une très grande hétérogénéité au niveau de la densité des cèdres ne l'ont pas permis.

Dans la zone dépressée :

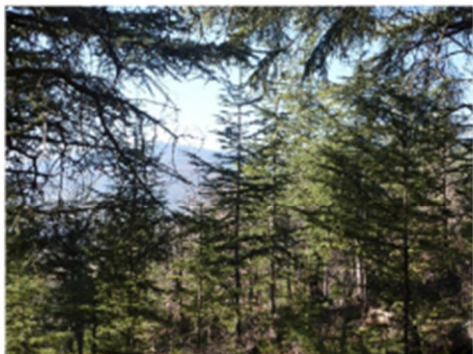
- comptage des tiges coupées lors du dépressage ;
- inventaire, par classe de diamètre, de tous les cèdres vivants (diamètre > 7cm et hauteur >1,30 m), notation de leur statut social et de leur état sanitaire ;
- numérotation et mesure du diamètre et de la hauteur totale de 14 arbres de statut social et d'état sanitaire différent.

Dans la zone non dépressée :

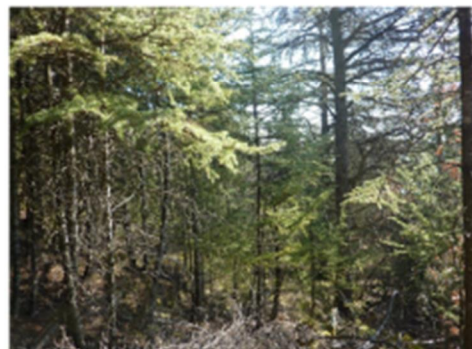
- comptage de tous les semis de cèdre sur pied vivant de diamètre inférieur à 7 cm et de hauteur supérieure à 1,30 m ;
- inventaire, par classe de diamètre, de tous les cèdres vivants (diamètre > 7cm et hauteur >1,30 m), notation de leur statut social et de leur état sanitaire ;
- comptage des cèdres morts
- sélection, numérotation et mesures du diamètre et de la hauteur totale de 14 arbres de de statut social différent.

Rq : dans les deux situations, les jeunes semis (<1,30 m) n'ont pas été comptabilisés ; ils étaient beaucoup plus nombreux dans la partie dépressée (cf. photos page suivante).

Dépressée



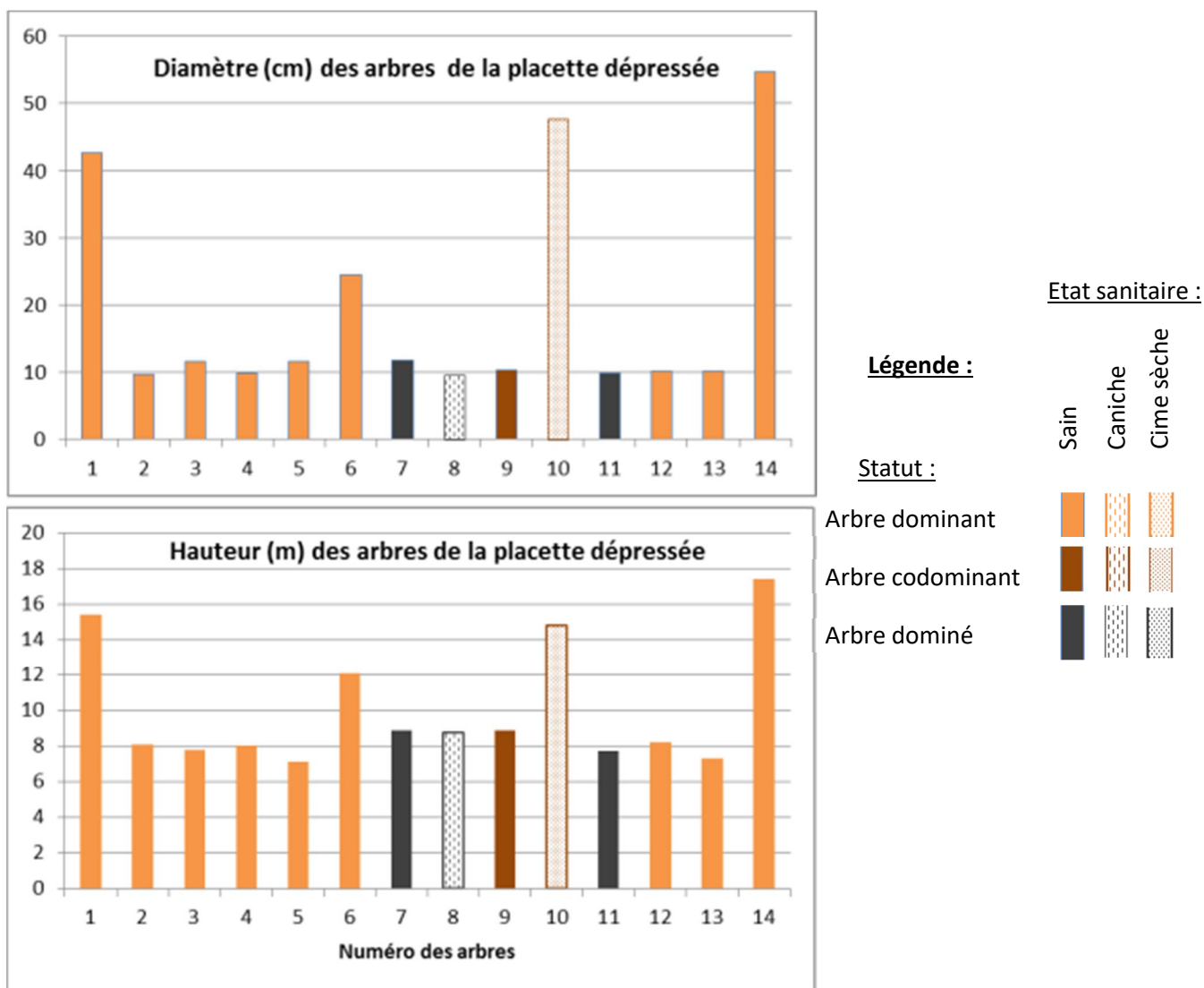
Non dépressée



Photos : S. Girard, CNPF-IDF

Bilan de la placette dépressée : il n'y a aucun arbre mort et 364 souches coupées ont été comptées (soit de l'ordre de 9 100/ha) ; **50 semis** vivants ont un diamètre inférieur à 7 cm et une hauteur supérieure à 1,30 m et **22 cèdres** avec un diamètre supérieur à 7 cm (entre 7 et 54.6 cm), ce qui correspond, avant dépressage, à une densité de 10 900 tiges/ha et aujourd'hui de **1 800 tiges/ha**.

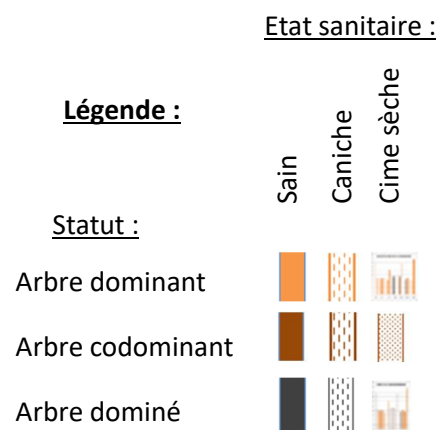
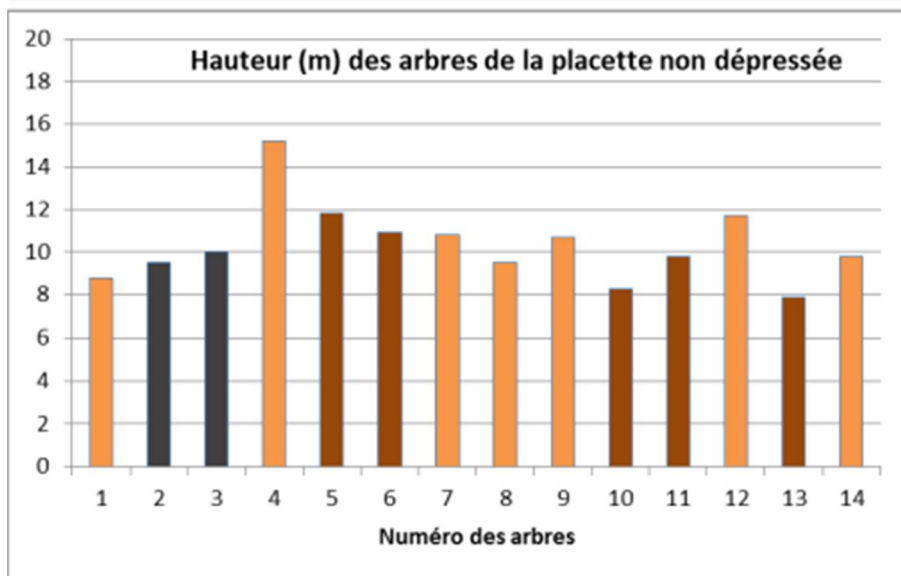
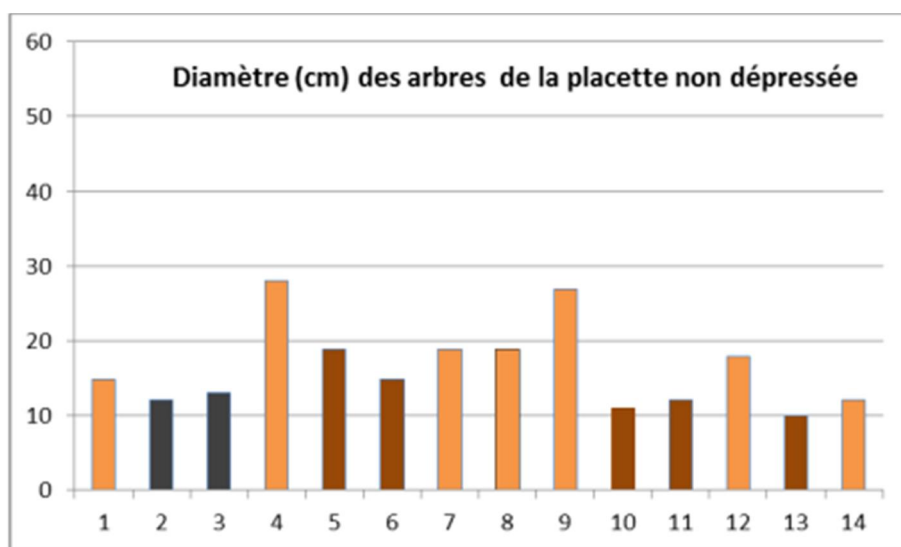
Parmi les 14 arbres numérotés (graphes ci-dessous), trois ont un diamètre supérieur à 40 cm et une hauteur supérieure à 14 m, la plupart des autres avoisinant les 10 cm de diamètre et 8 mètres de hauteurs. Le diamètre moyen est 19,6 cm et la hauteur 10 mètres. La plupart de ces arbres sont dominants (9/14), sains (12/14) ; un présente néanmoins une cime sèche (le n° 10) et un autre un port en caniche (le n°8).



Jacques Sozet (ONF) signale que depuis le dépressage, 3 individus supplémentaires montrent des signes d'anomalies de croissance, ce qui traduit, selon lui, une stabilisation du phénomène.

Bilan de la placette non dépressée : **36** cèdres desséchés et morts dont un de 44 cm de diamètre, **285** semis vivants avec un diamètre inférieur à 7 cm et une hauteur supérieure à 1,30 m et **61** cèdres avec un diamètre supérieur à 7 cm, dont le plus gros, foudroyé, atteint 82 cm ; le diamètre moyen des autres arbres étant de 11,9 cm. La densité totale est donc de **9 550 cèdres à l'hectare**, valeur légèrement inférieure à celle que nous avons estimée dans la partie dépressée (8 % de tiges en moins).

Parmi les 14 arbres numérotés (graphes ci-dessous), deux ont un diamètre supérieur à 20 cm et un seul une hauteur supérieure à 14 m. Le diamètre moyen est 17,5 cm et la hauteur de 10,3 m. Tous sont sains. Signalons que sur l'ensemble des 60 cèdres ayant un diamètre supérieur à 7 cm dans cette placette, 4 avaient une cime sèche et 4 autres un port en caniche, 14 % de tiges recensées présentaient donc des anomalies de croissance. Le défaut de cime sèche a été observé sur des arbres de statut social différent (dominant, codominant et dominé), le port en caniche ne concernait aucun arbre dominant sur cette placette.



Le tableau ci-dessous récapitule les éléments recueillis sur les deux placettes :

		Placette dépressée	Placette non dépressée
Densité initiale *		10 900	?
Densité 2017 *		1 800	9 950
Tous les arbres mesurés	Nombre de cèdres mesurés	22	61
	Sains	18/22 = 82 %	52/60 = 86 %
	Caniche	2/22 = 9 %	4/60 = 7 %
	Cime sèche	2/22 = 9 %	4/60 = 7 %
	Dominant	11/22 = 50 %	21/61 = 33 %
	Codominant	5/22 = 23 %	20/61 = 33 %
	Dominé	6/22 = 27 %	20/61 = 33 %
	Moyenne Diamètre	15,8	13,1
	Diam Min (cm)	8	7
	Diam Max (cm)	54,6	82,0
14 arbres marqués	Moyenne Ht (m)	10,0	10,3
	Ht Min (m)	7,1	7,9
	Ht Max (m)	17,4	15,2
	Moyenne Diamètre	19,6	17,5
	Diam Min (cm)	9,6	11,3
	Diam Max (cm)	54,6	28,1

Il s'agissait dans cette étude de se donner les moyens de savoir si le dépressage d'une régénération naturelle pouvait impacter l'état sanitaire du peuplement. Nous avons donc établi un « point zéro » sur une parcelle qui a fait l'objet d'une telle opération il y a 3 ans. Les arbres repérés et mesurés en avril 2017 pourront faire l'objet d'un suivi tant dendrométrique que sanitaire pour apporter des éléments de réponse dans les prochaines années.

Différentes modalités de dépressage en plantation

Contributeurs : IDF-CNPF et CRPF-AURA, Phase 2

Afin de pouvoir proposer des solutions opérationnelles permettant d'améliorer l'état des peuplements présentant des anomalies de croissance, nous avons expérimenté deux modalités de dépressage dans une plantation âgée d'une trentaine d'année. Nous avons caractérisé l'état de la parcelle avant l'opération tant au plan sanitaire qu'au plan dendrométrique, il s'agira dans les prochaines années, d'en suivre l'évolution de comparativement à la partie « témoin » qui n'a subi aucune intervention.

La parcelle concernée- d'une surface totale de 1.45 ha- se trouve sur la commune de St Marcel-lès-Annonay (à 6 km au nord-ouest d'Annonay), à 620 m d'altitude au milieu d'un versant globalement orienté au Nord Est. Plantés en 1987 après sous-solage à une densité de 1 100 plants/ha (écartement de 3 x 3m, plants 1-0G WM, étiquette bleue), aucun entretien n'a été effectué les premières années, tous les arbres ont été élagués jusqu'à 2 mètres (élagage de pénétration) et dépressés en 2002 soit 15 ans après plantation (densité ramenée à 850 tiges/ha). Le Plan Simple de Gestion de la propriété prévoyait un nouveau dépressage en 2018 et le propriétaire a accepté de tester différentes modalités qui ont été mises en œuvre en mai 2018.

La parcelle est bordée au nord par une prairie ; les arbres de bordures sont de ce fait particulièrement exposés aux vents froids. La partie sud de la parcelle se trouve bien exposée au soleil dans la mesure où les arbres en contrebas ne la dominent pas. C'est dans cette zone qu'il y a eu le plus de mortalité et que les anomalies de croissance ont commencé à apparaître.

A la suite des différents résultats obtenus au cours de l'étude, nous avons cherché à « abriter » les arbres en place pour limiter les alternances gel/dégel. Trois zones ont ainsi été définies, chacune d'entre elles correspondant à une modalité de dépressage :

-dépressage « classique » : enlever 1 arbre /5 en privilégiant l'abattage des arbres atteints d'anomalie de croissance.

-dépressage « classique » en gardant une bande protectrice au nord et au sud non dépressée d'environ 15 m de large (ce qui correspond à l'emplacement de 5 arbres)

-une zone témoin sans dépressage

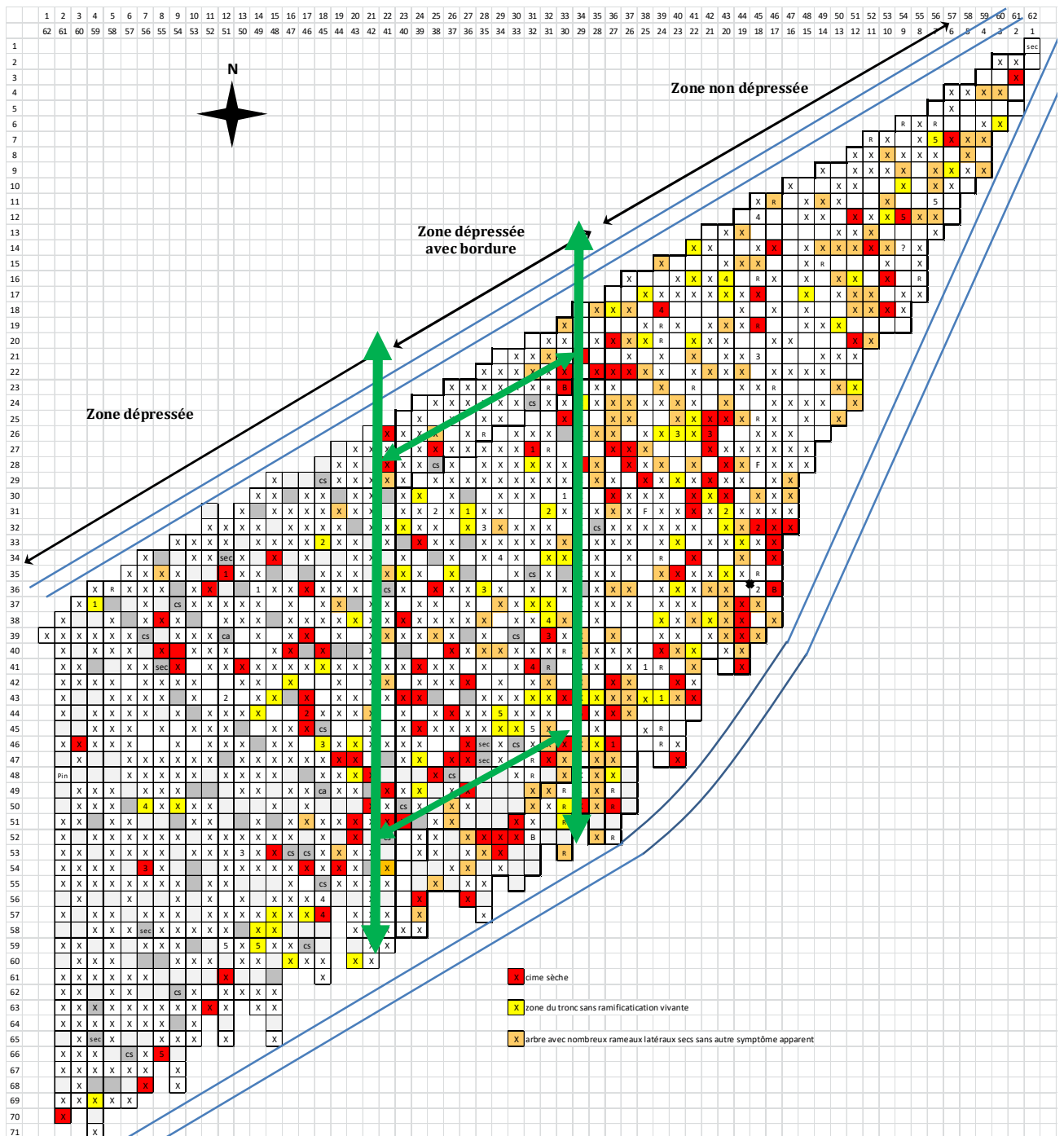


Fig.16 : Localisation des modalités de dépressage sur la parcelle de St Marcel (traits verts), des arbres abattus en mai 2018 (en grisé) et des arbres présentant une anomalie de croissance en mars 2018 (en rouge : cime sèche ancienne ; en jaune : facies caniche ; en orange : présence de rameaux latéraux desséchés) (S. Girard, CNPF, 2018).



Photo 22 : Vue générale de la plantation après dépressage (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Dans chacune des trois modalités, 5 arbres sains en 2018, 5 ayant une cime sèche et 5 autres ayant un port en caniche ont été désignés et mesurés ; ils feront l'objet d'un suivi dans les prochaines années. Au total 5 arbres x 3 statuts sanitaires x 3 modalités soit 30 arbres seront régulièrement mesurés et l'état de leur houppier fera l'objet de notations.

Nouvelle carte de vigilance pour le cèdre

Contributeurs : IDF-CNPF, Phase 2

A la suite de la première phase de l'étude, une carte de vigilance, présentant la probabilité d'observer le phénomène de dessèchement de cime en un point donné avait été proposée (carte 3 page 22). Elle était basée sur la moyenne de la température minimale de mars calculée par les modèles climatiques en un point donné et l'indice topographique de ce point, indice également calculé par un modèle numérique de terrain. Précisons que la température minimale de mars prise en compte dans l'élaboration de cette première carte a été calculée à partir de données moyennées sur 30 ans (de 1981 à 2010).

Lors de la deuxième phase de l'étude, nous avons travaillé à partir de données de température non plus moyennées sur 30 ans mais annualisées. Pour chaque année de 1981 à 2010, et sur chaque « brique » de territoire (c'est-à-dire chaque maille « Safan » de 8x 8 km soit 1000 briques au niveau français), les températures minimales absolues atteintes sous abri au cours du mois de mars ont été calculées ainsi que la moyenne des températures minimales du même mois. La relation mathématique entre ces deux variables a été recherchée.

Par ailleurs, les différents résultats obtenus lors de la phase 2 nous ont permis d'affiner le raisonnement. Ainsi, à partir des valeurs de température générant des dégâts au niveau des tissus (étude INRA), nous avons définis empiriquement des seuils thermiques pour les différents organes de la partie aérienne du cèdre :

- ⇒ Si la température minimale absolue de mars sous abri est supérieure à -10 °C, le risque d'anomalie de croissance est nul ;
- ⇒ Si la température minimale absolue de mars sous abri est comprise entre -10 °C et -14 °C des dégâts peuvent survenir au niveau foliaire et provoquer des pertes d'aiguilles, dans ce cas, le niveau de risque a été fixé à 0.5 ;
- ⇒ Si la température minimale absolue de mars sous abri est comprise entre -14 °C et -18 °C, il existe un risque d'altération du cambium, dans ce cas, le niveau de risque a été fixé à 0.75 ;
- ⇒ Si la température minimale absolue de mars sous abri est inférieure à -18 °C, la survie des cèdres est en cause, le risque de mortalité est maximum (valeur à 1) = risque de mortalité.

Ainsi, chaque maille safran a pu être affectée d'une probabilité d'atteindre ces seuils. L'équation logistique reliant la probabilité d'avoir des anomalies de croissance à la moyenne des températures minimales du mois de mars est précisée sur la figure 17.

**Evolution du risque de présence d'anomalie de croissance lié au gel de mars
chez le cèdre de l'Atlas en France**

equation logistique = $1/(1+\exp(-0.94+0.584*TN03\ 1981-10))$ $R^2 = 0.97$

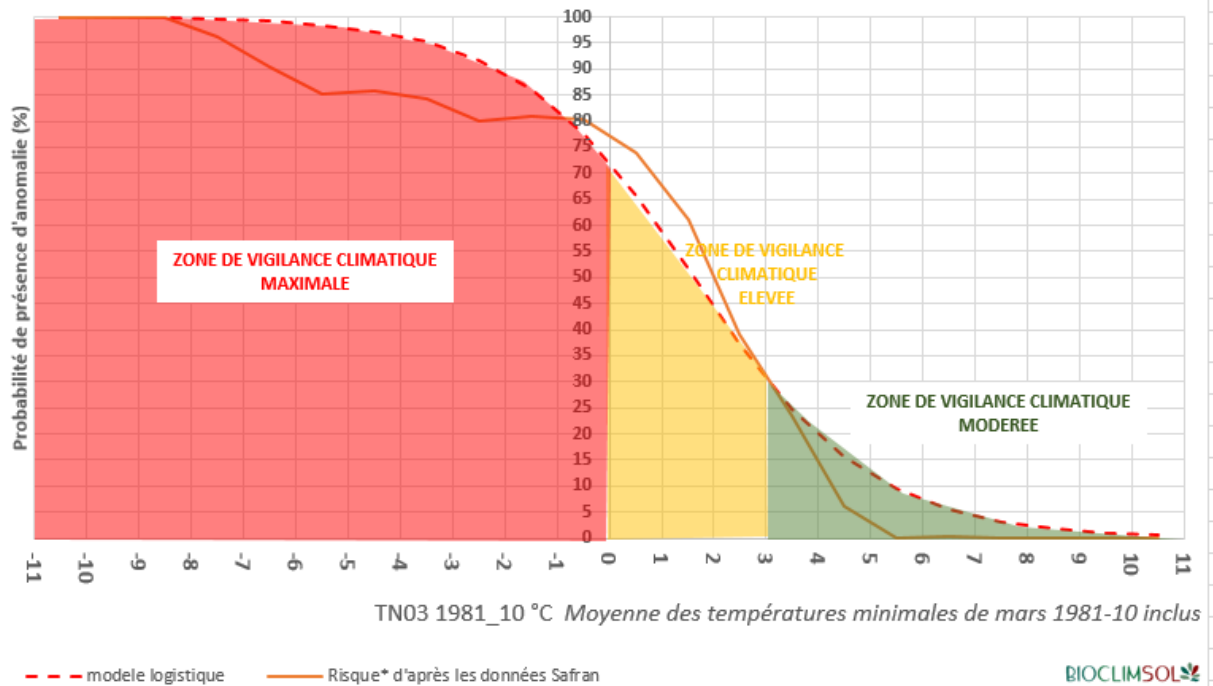


Figure 17 : Relation entre le risque d'anomalies de croissance chez le cèdre de l'Atlas en fonction de la moyenne des température minimales du mois de mars : en trait pointillé, la relation ne tient pas compte de l'impact différentiel du gel sur les tissus ; en trait plein, la relation intègre l'impact différentiel du gel sur les tissus en pondérant le niveau de risque selon des seuils de températures définis empiriquement.

Les paramètres de l'équation logistique connus, il a été possible de tracer la carte de vigilance à une résolution beaucoup plus fine (1 km) en utilisant les données AURELHY (Fig. 18).

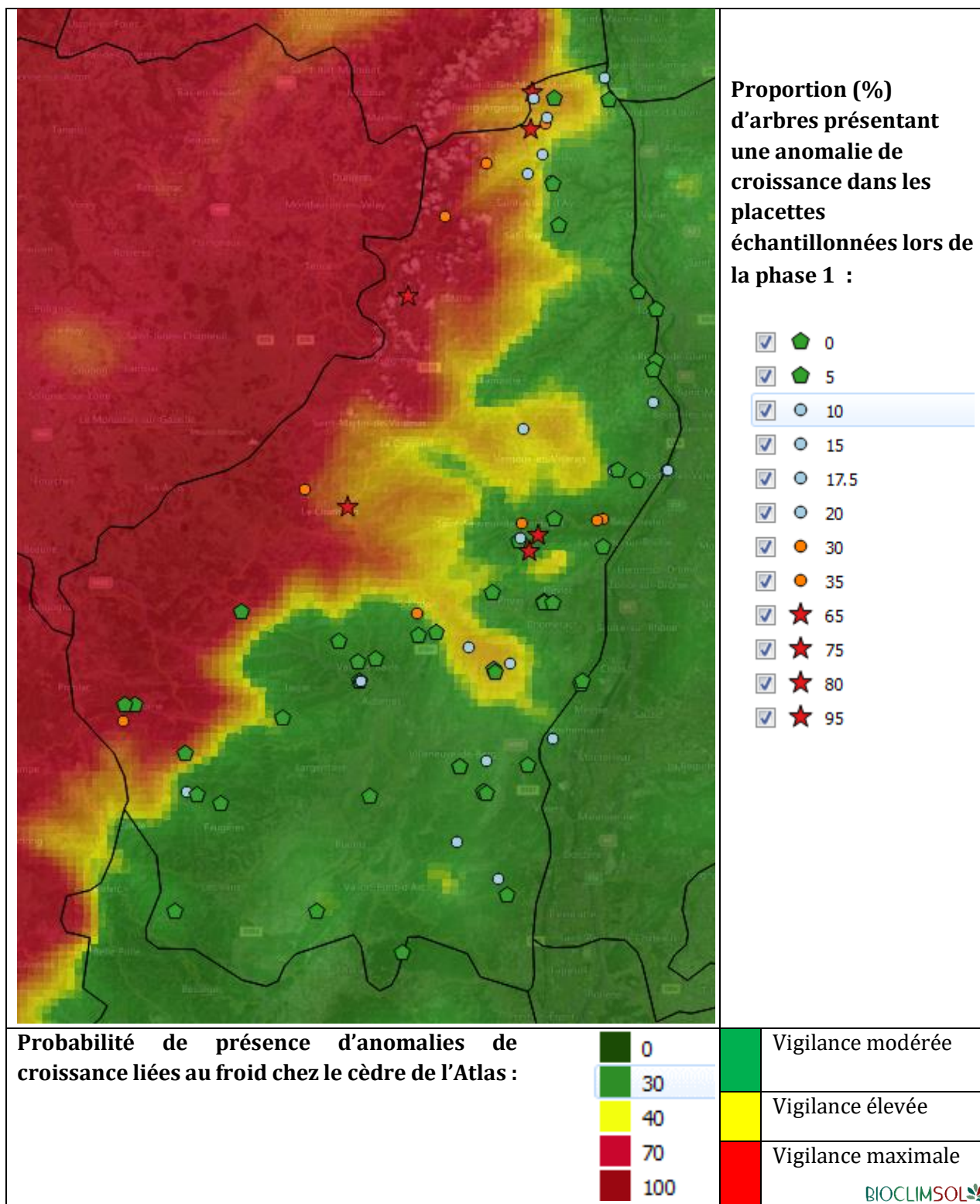


Figure 18: Carte de vigilance climatique pour le cèdre de l'Atlas en Ardèche et positionnement des 82 placettes mesurées en 2014 (les symboles utilisés traduisent l'intensité des anomalies de croissance du houppier constatées alors). (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Les facteurs abiotiques liés aux anomalies de croissance du cèdre observées en Ardèche ces dernières années : synthèse

Contributeurs : IDF-CNPF, Phase 2

Les études menées depuis 2014 ont permis d'identifier trois facteurs liés aux anomalies de croissance observées dans le houpier des cèdre de l'Atlas ardéchois :

- **le froid** que par les arbres subissent en fin d'hiver : plus les températures sont basses, plus le risque d'anomalie est élevé ;
- **l'exposition** de la parcelle : les versants chauds (au sud et à l'ouest) sont plus touchés que les autres, surtout dans les zones où la vigilance climatique est élevée ou maximale ;
- **la position topographique** de la parcelle : les hauts de versant étant les zones les plus touchées.

Nous avons testé la pertinence de ces trois variables stationnelles en les mettant en lien avec les observations faites en 2014 sur 82 placettes.

A noter que la variable «dégats» à expliquer n'a concerné que les seules anomalies de croissance altérant la qualité du bois : à savoir la présence d'arbres morts, présentant un port en boule ou un dessèchement de leur cime. Le dessèchement partiel du port en « caniche » n'a pas été retenu dans la mesure où nos observations ont montré qu'il n'altérerait pas la qualité du bois.

Le gel

Le risque lié au gel est exprimé par la carte de vigilance climatique qui exprime en chaque point du territoire, la probabilité de subir un froid intense susceptible d'altérer la croissance du cèdre (Fig.18 page 69).

En groupant les parcelles décrites en 2014 selon leur niveau de vigilance climatique, on montre que celles qui se trouvent en zone de vigilance climatique élevée présentent un niveau de dégâts plus important ($p=0.014$), Fig 19.

En moyenne 5 % des tiges présentent des « dégâts » lorsque le peuplement est situé en zone de vigilance climatique modérée (classe de 0 à 29.9 sur la figure 19 ou sur la partie verte de la carte page 69).

En revanche, cette proportion est de 23 % pour les parcelles situées en zones de vigilance climatique plus élevée (classes >50 % sur la figure 19 ou sur les parties jaune foncé et rouge de la carte page 69).

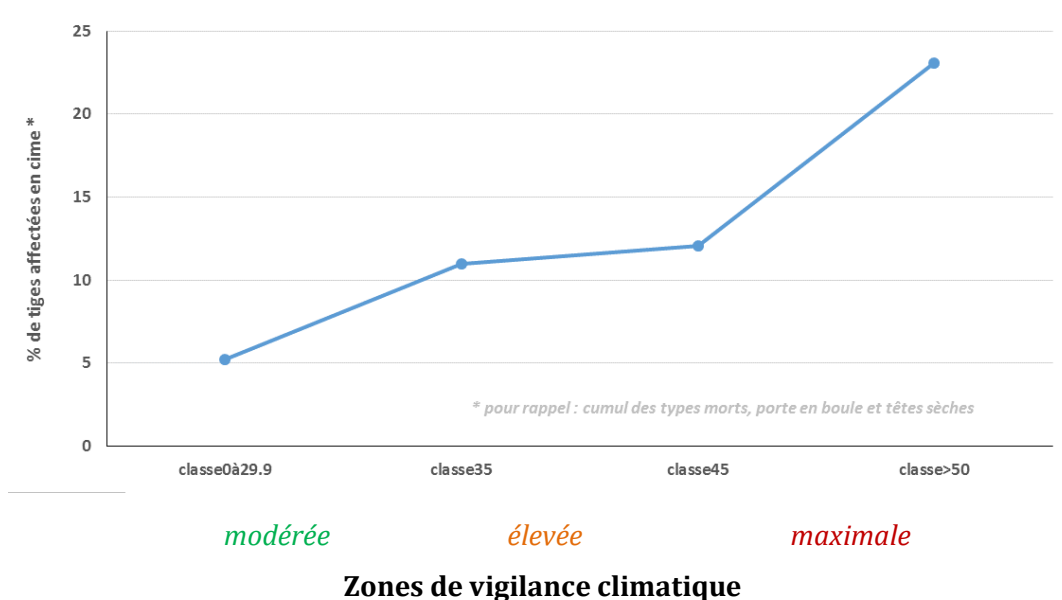


Figure 19 : Taux de dégâts observés en 2014 dans 82 parcelles ardéchoises selon la zone de vigilance climatique à laquelle elles appartiennent. (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Exposition

Le facteur « exposition » peut se traduire par un indice de climat lumineux qui combine la position topographique d'une parcelle et le rayonnement solaire qu'elle reçoit (IKR, indice utilisé dans l'étude de la spatialisation des dégâts sur la parcelle d'Eteize, page 40).

Nous avons groupé les parcelles étudiées en 2014 selon qu'elles se trouvent dans des situations chaudes (IKR ≥ 1.07) ou fraîches ou neutres (IKR < 1.07).

Les facteurs gel et exposition ont statistiquement un effet significatif sur la présence et l'intensité des dégâts observés dans les parcelles en 2014 ($p=0.02$). L'interaction des deux n'est pas significative ($p=0.109$).

L'effet de l'exposition est très net pour les parcelles situées en zones de vigilance climatique élevée et maximale : en versant chaud, 25 % de leurs tiges sont touchées en moyenne contre 10 % environ dans les autres situations (Fig. 20).

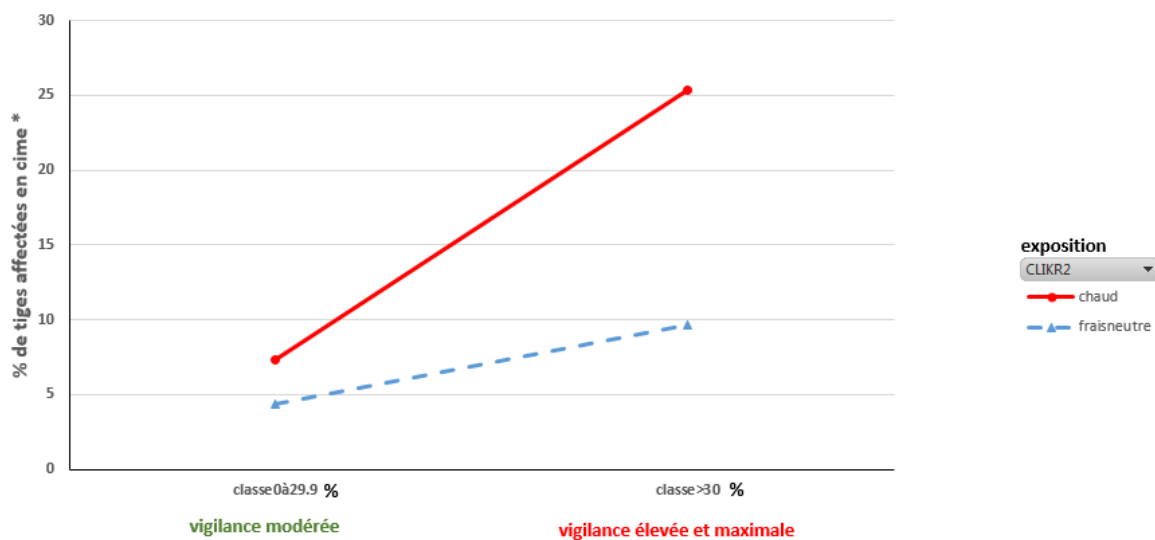


Figure 20 : Taux de dégâts observés en 2014 dans 82 parcelles ardéchoises selon la zone de vigilance climatique à laquelle elles appartiennent et selon leur exposition. (J. Lemaire, CNPF, 2018)

La position topographique

Indépendamment de la zone de vigilance climatique dans laquelle se trouvent les parcelles étudiées en 2014, les dégâts sont plus nombreux en haut de versant qu'ailleurs. Les plateaux et fond de vallon sont environ 5 fois moins touchés que les hauts de versant. Les versants sont en moyenne 2 fois moins touchés que les hauts de versant (Fig. 21). La différence est significative au seuil de 3% de probabilité.

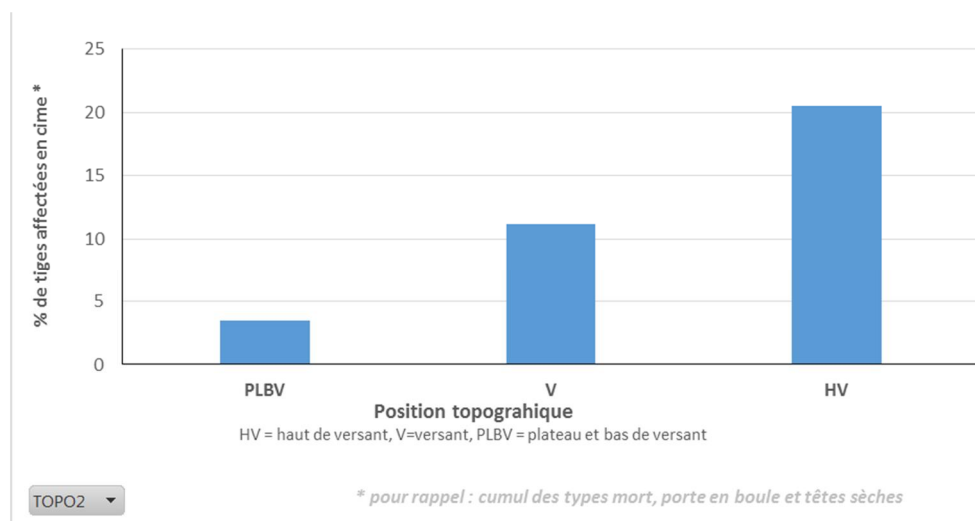


Figure 21 : Taux de dégâts observés en 2014 dans 82 parcelles ardéchoises selon leur position topographique. (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Combinaison des trois facteurs

Le graphique ci-dessous (Fig.22) permet de comprendre dans quelles stations ardéchoises le problème d'anomalie de croissance des cèdres est plus fréquent. Les peuplements en zone de vigilance modérée sont peu affectés par des anomalies de croissance quelles que soient leur exposition et leur position topographique.

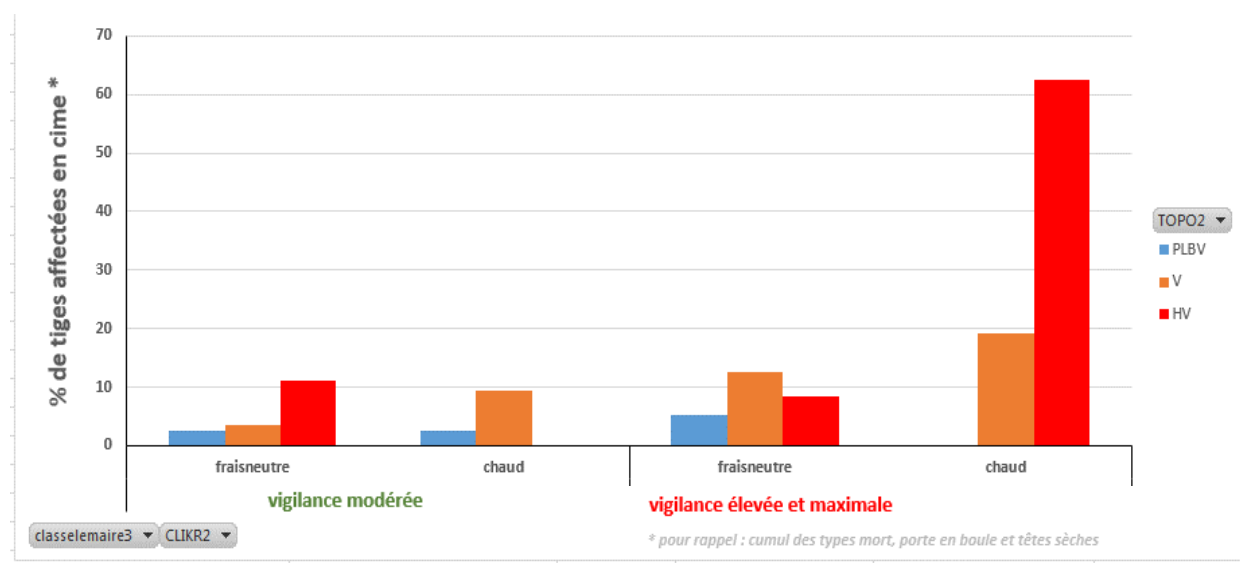


Figure 22 : Taux de dégâts observés en 2014 dans 82 parcelles ardéchoises selon la zone de vigilance climatique à laquelle elles appartiennent, leur exposition (« frais/neutre » ou « chaud ») et leur position topographique (« PLBV » = Plateau et bas de versant, « V » = versant, « HV » = Haut de versant). (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Par contre, en zones de vigilance climatique élevée et maximale, les peuplements situés en haut de versant et en exposition chaude sont très affectés avec plus de 60 % des tiges touchées. Dans ces mêmes zones, les peuplements situés en versant chaud ont des dégâts sur presque 20 % de leurs tiges contre 2 à 12 % dans les autres situations.

Au regard de ses éléments, nous proposons la clef de diagnostic suivante pour déterminer si une station est favorable au cèdre dans le climat ardéchois :

- ⇒ En zone de vigilance climatique modérée => la station est climatiquement favorable au cèdre de l'Atlas.
- ⇒ En zone de vigilance climatique élevée => ne pas planter le cèdre sur les versants et les hauts de versants exposés Sud Ouest et Ouest ; privilégier les versants frais ou neutre. Planter les cèdres en mélange avec des essences à forte croissance en bordure de plantation.
- ⇒ En zone de vigilance maximale, nous déconseillons de planter du cèdre de l'Atlas.

Cette clef a été appliquée aux 82 placettes mesurées en 2014 pour savoir si elle permettait d'identifier les placettes touchées à plus de 10 % (rq : seuls les dégats impactant la qualité du bois ont été retenus). Elle permet de classer les parcelles dans la bonne catégorie (parcelles peu ou pas touchées versus parcelle touchée) 7 fois sur 10.

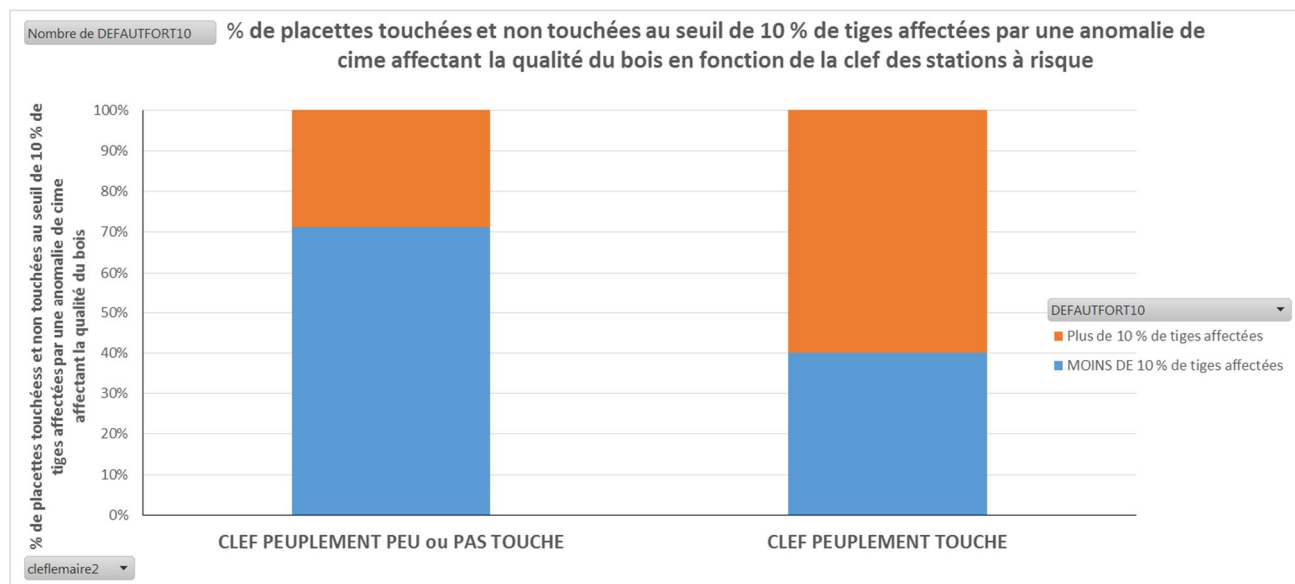


Figure 23 : Qualité de la clef de diagnostic proposée pour l'état des peuplements de cèdre de l'Atlas en place en Ardèche (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Proposition d'interprétation :

Le fait que, dans les zones les plus froides de département- en zone de vigilance climatique élevée ou maximale- les expositions chaudes soient nettement plus affectées que les autres est assez contre-intuitif : les exposition les plus froides devraient être plus touchées si l'explication du phénomène était le gel... Cette situation évoque la possibilité que ce **soit la succession d'une température très froide (en général en fin de nuit) et le réchauffement rapide en journée lorsque l'arbre se trouve en exposition chaude qui entraîne les dégats observés.**

Au plan physiologique, il s'agirait de la prise en glace de certains tissus suivis de leur dégel rapide, provoquant la lyse des cellules concernées. Le phénomène est plus graduel et moins impactant dans les zones fraîches où les contrastes thermiques sont moins importants. Ce phénomène de gel/dégel entraîne des dégats appelés « frost cracking » en anglais induisant une nécrose cambiale. Très connu chez de nombreuses espèces feuillues (chêne, hêtre, châtaignier, noyer, bouleau verruqueux...), il est également documenté chez des résineux- épicéa et sapin notamment- chez lesquels, outre les fissures d'écorce, il peut s'accompagner d'exsudations aqueuses ou résineuses (Miller, 1993...). Cet auteur explique que les froids

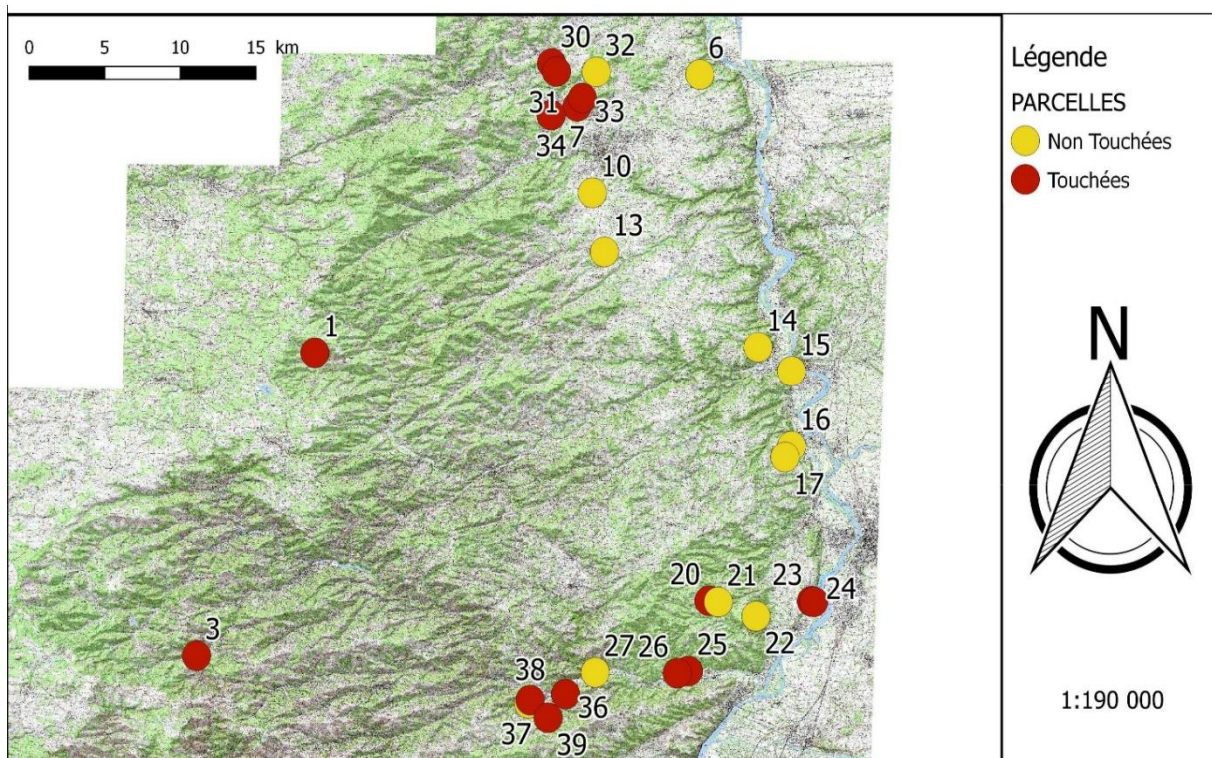
intenses et soudains, le bois se rétrécit plus dans une direction tangentielle que radiale provoquant des fissures pouvant atteindre plusieurs mètres de long.

Nos résultats suggèrent que, les années avec des épisodes froids et soudains surviennent en fin d'hiver et notamment lors des épisodes météorologiques de type « Moscou-Paris », les cèdres très exposés au soleil sont victimes de ce phénomène.

Impact des anomalies sur la croissance des cèdres en Ardèche

Contributeurs : IDF-CNPF, Phase 2

L'objectif de cette partie de l'étude visait à comparer la croissance de cèdres sains avec celle d'arbres ayant des anomalies de cimes. Trente placettes ont été retenues, toutes localisées dans la zone la plus impactée par le phénomène à savoir la moitié nord de l'Ardèche. Elles ont été sélectionnées parmi les 81 placettes étudiées durant la phase 1 du projet (localisation sur la Fig. 24). Nous avons veillé à sélectionner autant de parcelles touchées (plus de 10 % des tiges impactées par une anomalie de cimes représentées par les points rouges sur la figure) que de parcelles peu ou non touchées (moins de 10 % des tiges touchées représentées par les points jaunes). Les mesures ont été effectuées par Maxence L'Hullier (stagiaire BTA du CEFA de Montélimar).



Carte 5 : Localisation des 30 parcelles de cèdres étudiées lors de l'étude dendrologique, en rouge les parcelles affectées par une anomalie de croissance, en jaune les parcelles non affectées (M. L'hullier, 2018)

Protocole de mesure

Une fois la parcelle sélectionnée dans la base de données issue de la première phase de l'étude, l'opérateur note ses coordonnées géodésiques et se rend au centre de la placette à l'aide du GPS.

Une placette circulaire de 10 m de rayon est alors installée (utilisation du Vertex). En moyenne 30 à 35 arbres (densité moyenne des plantations étudiées 1100 tiges/ha) sont ensuite numérotés par placette.

Pour chaque tige dominante et co-dominante, la hauteur totale, la longueur du houppier vivant et le diamètre à 1 m 30 sont mesurés et le type d'anomalie noté (*cf.* typologie page 8). Pour les arbres atteints d'anomalies de croissance, la longueur cumulée des défauts de cime est mesurée. Les mesures effectuées, le nombre d'arbres sains et touchés est compté.

Si pour une de ces catégories, il y a moins de 12 tiges, on agrandit la placette en vue d'augmenter le nombre de tiges de la catégorie minoritaire. L'opérateur se rend alors, de façon systématique, vers le Sud sur les trois prochaines lignes de plantation. Il essaie de compléter l'effectif pour arriver au nombre minimal de 12 tiges pour le type minoritaire. Si dans la direction Sud le nombre d'arbre inclus est insuffisant, il se rend ensuite à l'Est, au Nord et à l'Ouest. Les mesures sont alors effectuées sur ces arbres.

Par ailleurs, pour les 15 placettes « touchées » échantillonnées, une carotte à cœur à 50 cm de hauteur au-dessus de l'empatement est prélevée sur 2 arbres sains dont le diamètre moyen est le plus proche du diamètre moyen des arbres sains de la placette. Le même prélèvement est effectué sur les arbres touchés dont le diamètre est le plus proche du diamètre moyen des arbres touchés de la placette. 4 arbres sont donc carottés sur chaque placette.

Les carottes permettent de déterminer l'âge des arbres et de mesurer la longueur cumulée des cernes des 5, 10 années et 20 dernières années et la longueur à cœur. Ces mesures sont effectuées sur le terrain à l'aide d'une règle, au mm près. La circonférence à 1m30, ainsi qu'à 50 cm de chacun des arbres carottés est relevée. Le rapport entre la circonférence à 50 cm et à 1 m 30 est calculé et permet d'obtenir des largeurs de cernes à 1 m 30 de hauteur.

L'objectif de ce protocole est de fonctionner par le système de couple. On peut ainsi comparer les arbres touchés par une anomalie de cimes avec les arbres non touchés. En effet, les arbres sains et non sains étant dans la même placette, ils ont le même âge, même sylviculture, même station, même provenance génétique.

Résultats et propositions d'interprétations

Signalons que les arbres « touchés » qui ont été échantillonnés selon le protocole décrit précédemment correspondent dans presque tous les cas (93 %) à des arbres présentant des cimes sèches.

La comparaison de la **hauteur totale vivante**, indique des différences très hautement significatives entre les arbres touchés et sains ($P=0.000$). Parmi les arbres touchés, le type cime sèche se démarque des autres, il a logiquement une hauteur significativement inférieure (moyenne = 8,3 m). Les arbres avec un port en caniche sont les plus hauts (11,1 m en moyenne), tandis que les arbres sains mesurent en moyenne 10,5 m). La différence de hauteur totale vivante entre les types caniches et les arbres sains est toutefois non significative alors qu'elle est très hautement significative entre « cimes sèches » d'une part et « sains » et « caniches » d'autre part (Fig. 24).

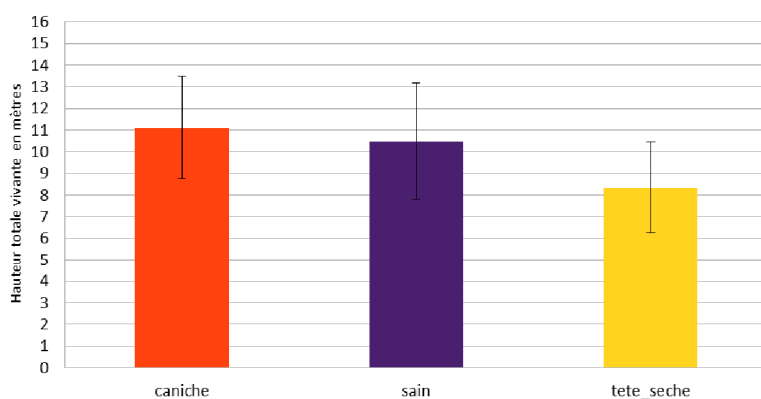


Figure 24 : Hauteur vivante (en mètre) des cèdres mesurés selon la qualité de leur houppier (J. Lemaire, CNPF, 2018)

La **hauteur totale** des arbres, qui intègre la longueur de la cime sèche (Fig.25), il n'y a plus de différence significative entre les 3 catégories : tous les arbres, quelle que soit la qualité de leur houppier ont des hauteurs similaires. On peut néanmoins remarquer, la tendance caniche relevée précédemment à savoir que « caniches » sont plus grands que les arbres sains, eux même plus grands que les cimes sèches.

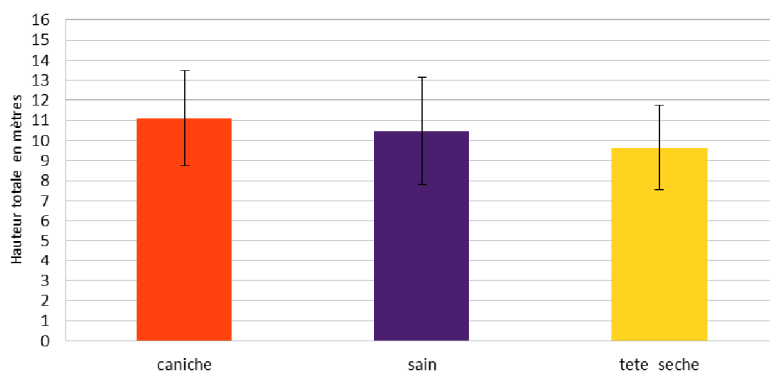


Figure 25 : Hauteur totale (en mètre) des cèdres mesurés selon la qualité de leur houppier. Rq : dans le cas des arbres présentant une cime sèche, la hauteur indiquée intègre la hauteur atteinte par lpartie sèche (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Logiquement la longueur de houppier vivant (Fig.26) –qui correspond à longueur de cime de laquelle on a retranché les parties mortes dues aux anomalies- est significativement différente selon les différents types.

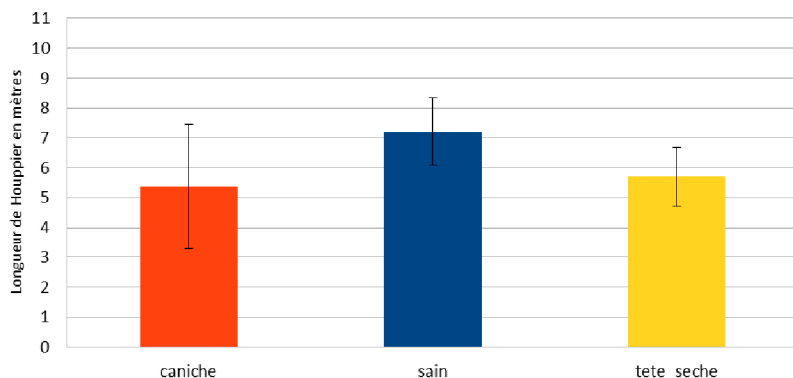


Figure 26 : Longueur du houppier vivant (en mètre) des cèdres mesurés en fonction de la qualité de leur houppier. (J. Lemaire, CNPF, 2018)

La hauteur d'apparition de la première anomalie dans le houppier (« cou » du caniche ou cime sèche), se situe en moyenne à 86 % de la hauteur totale avec un coefficient de variation très faible de 6 % (Fig.27). Il est remarquable de constater que cette hauteur exprimée en proportion de la hauteur totale est très stable.

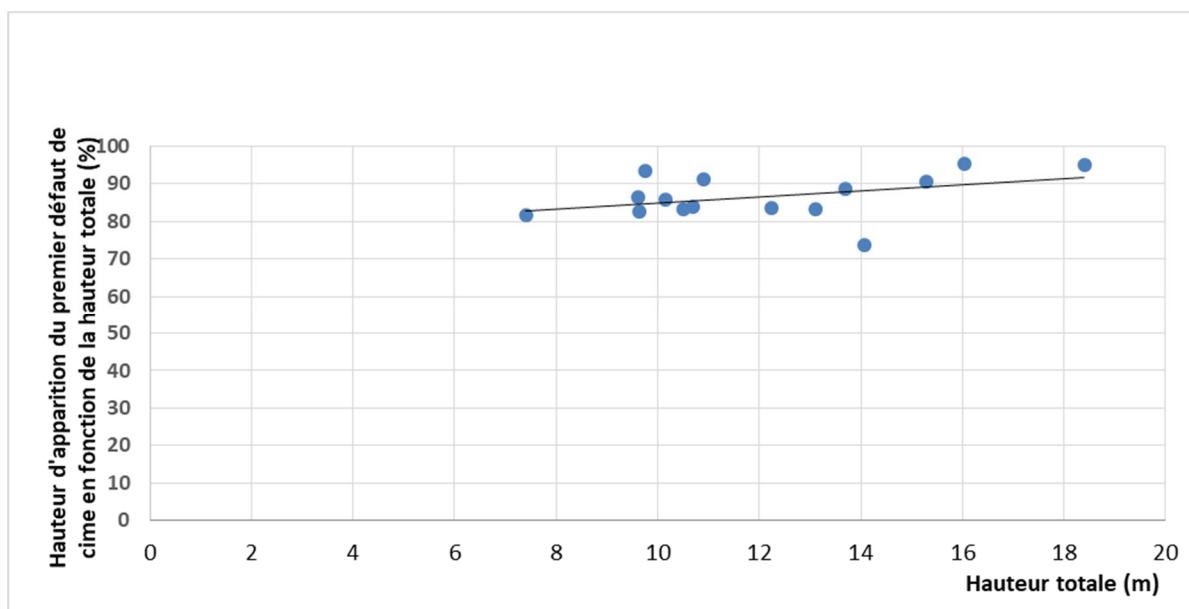


Figure 27 : Hauteur d'apparition du premier défaut dans le houppier des arbres touchés en fonction de leur hauteur totale. Un point correspond à la moyenne de valeurs obtenus pour les 24 arbres d'une placette de mesure (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Si on examine cette fois, le **diamètre des arbres** (Fig.28), les différences ne se sont pas statistiquement significatives au seuil de 5 %. Il semblerait toutefois que les « cimes sèches » aient un diamètre moyen supérieur aux types « caniche » et « sains ».

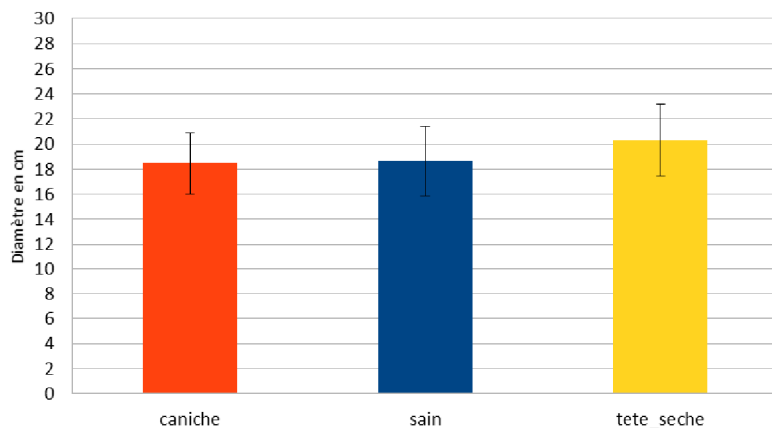


Figure 28 : Diamètre mesuré à 1.30 m (en cm) des cèdres mesurés en fonction de la qualité de leur houppier. (J. Lemaire, CNPF, 2018)

Les arbres touchés et non touchés ont donc des diamètres identiques. Grâce aux mesures de largeur de cerne, il est possible d'appréhender la dynamique de la croissance radiale (Fig.29).

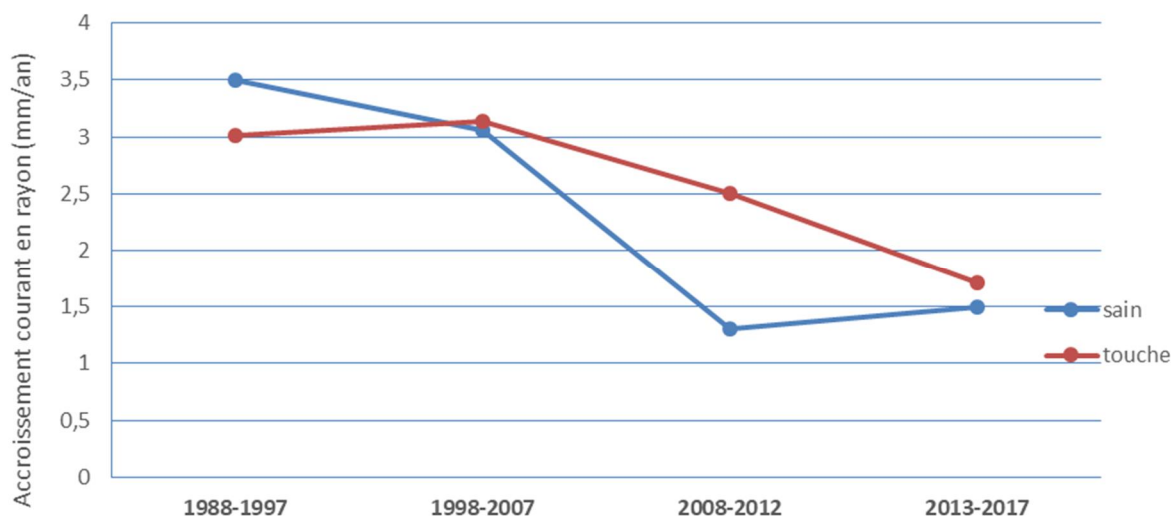


Figure 29 : Evolution de l'accroissement courant en rayon à 1.30 m (mm/an) depuis 1988 selon le statut de l'arbre (J. Lemaire, CNPF, 2018)

La croissance radiale moyenne des plantations étudiées était d'environ 3 mm à 10 ans, de 2 mm à 20 ans et de 1,6 mm aujourd'hui.

Il semble que durant les 10 années qui ont suivi la plantation (1988-1997), les arbres aujourd'hui « sains » étaient plus poussants que ceux actuellement « touchés ». Les peuplements étaient alors non fermés et la compétition entre les tiges *a priori* peu marquée.

Par la suite, la croissance des arbres « sains » a diminué de plus de la moitié, bien plus fortement que celle des arbres « touchés » (Fig.29).

Une hypothèse explicative de ces résultats pourrait être que les arbres sains actuellement, étaient plus poussants au début de la plantation parce que situés dans l'étage dominant. Du fait de leur hauteur plus importante, ils auraient été plus sensibles aux écarts de températures printanières. De ce fait des anomalies de croissance seraient apparues dans leur houppier ce qui aurait affecté en retour leur croissance radiale. Si ce raisonnement est poursuivi, on pourrait penser que les arbres dominés à l'époque qui n'ont pas été impactés et qui ont pu croître davantage que les touchés, passent dans l'étage dominant et soient à leur tour impactés et ainsi de suite...

Productivité des cédraies ardéchoises

En matière de productivité, tous les peuplements de l'Ardèche se situent en classe I de fertilité de hauteur dominante selon les courbes définies pour le Sud de la France par Toth (2005) (Fig.30) et cela, malgré l'impact des anomalies de croissance.

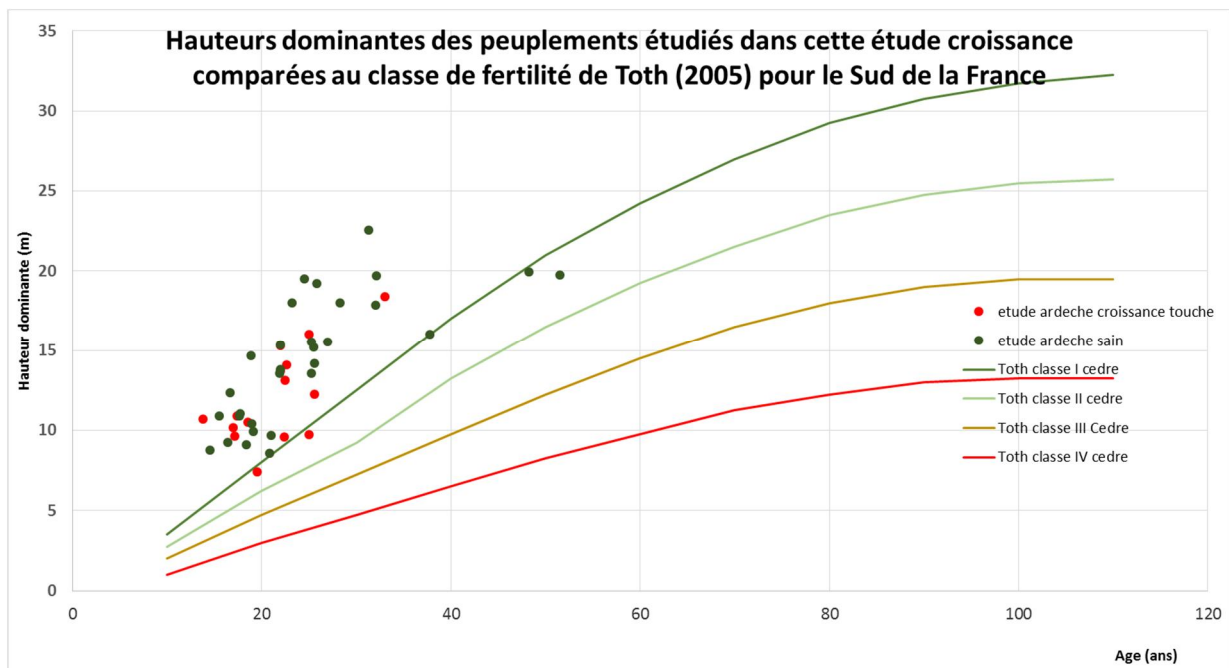


Figure 30 : Hauteurs dominantes des 30 peuplements étudiés. Les points verts correspondent aux peuplements sains, les points rouges, aux : peuplements présentant des anomalies de croissance (J. Lemaire, CNPF, 2018). Les courbes sont les courbes de croissance établies dans le Sud Est de la France par Toth (2005) selon la fertilité des stations.

Rappelons que l'âge moyen des plantations échantillonnées est de 30 ans en 2017 et que la densité de plantation était de 1100 tiges /ha. Pour disposer d'éléments de comparaison concernant l'accroissement en circonférence, il nous faut travailler avec les données relatives aux premières années de croissance de façon à nous affranchir de l'effet de la densité du peuplement (les courbes de Toth ont en effet été établies à partir de peuplements essentiellement issus de régénération naturelle, ayant une densité bien supérieure aux

1100 tiges /ha de nos plantations) et de l'effet lié à la compétition (10 ans après plantation, nous pouvons considéré que la compétition entre arbres est encore très faible). Ainsi, la croissance des arbres échantillonnés dans notre étude était en moyenne de 3 mm/an sur le rayon à 10 ans soit 1,88 cm sur la circonférence. Cette valeur correspond à une surface terrière qui atteignait alors 12 m²/ha. Cette valeur d'accroissement est inférieure de plus d'un tiers à celle que donne Toth au même âge pour des peuplements situés en classe de fertilité I à savoir 3 cm /an.

Cette différence de croissance pourrait être à mettre en relation avec les problèmes d'anomalies de cimes, seules des études dendro-chronologiques pourraient étayer cette hypothèse.

Aujourd'hui, la croissance en circonférence est très faible puisqu'elle atteint 1 cm/an et semble davantage liée à la surdensité des peuplements (la surface terrière des peuplements mesurés atteint en effet 25 m²/ha) qu'à l'effet du gel. Ce constat amène à préconiser d'éclaircir rapidement les peuplements.

Bilan et Conclusion

Depuis plusieurs années, des anomalies de croissance (dessèchement de cimes ou d'un segment du tronc, port en boule...) voire des mortalités de cèdres de l'Atlas sont constatés en Ardèche, en particulier dans la moitié nord du département. La première phase de l'étude (2013-15) avait permis de cartographier et quantifier les dégâts sur l'ensemble du département et de formuler les premières hypothèses quant aux facteurs explicatifs.

Il avait alors été montré que ces anomalies n'étaient pas liées à la nature du substrat géologique (calcaires, schistes ou granites), ni au déficit hydrique des dernières années, que leur présence était en revanche corrélée aux températures froides de la période hivernale.

La seconde phase du projet a donc exploré plus avant les liens entre le froid et les anomalies de croissance observées. L'évolution du niveau d'endurcissement au froid au cours de deux hivers a ainsi été enregistrée. Ce suivi a montré qu'en fin d'hiver (mars) des températures impactant fortement les tissus foliaires voire les rameaux pouvaient survenir sur le territoire étudié. Ainsi en mars 64, 70, 71, 73, 2005, 06 et 10 des températures inférieures à -12°C sous abri ont été enregistrées dans le secteur le plus vulnérable du département.

Le suivi a également mis en évidence des variations rapides du niveau de résistance au gel en fonction de la température de l'air ; ainsi, en mars 2018, après un mois de février froid, le niveau d'endurcissement était plus fort qu'en janvier de la même année tandis qu'un mois après, ce niveau était très bas.

L'abattage d'arbres présentant des décollements d'écorce sur le tronc, a permis de repérer des cernes entièrement noirs correspondant à l'année 2005. Les dégâts des arbres ayant une cime sèche ou un port en caniche concernent quant à eux la pousse mise en place en 2010. Dans les territoires les plus exposés, des températures exceptionnellement froides ont été enregistrées en mars de ces deux années : -16,2°C en 2005 et -13,5°C en 2010 sous abri.

Sur deux parcelles, une analyse spatiale de l'intensité et du type d'anomalies de croissance a pu être réalisée, ce qui a permis de mettre en évidence une moindre présence des phénomènes à proximité des bordures exposées au nord tandis que les expositions chaudes sont plus touchées. Cette situation évoque la possibilité que ce soit la succession d'une température très froide (en général en fin de nuit) et le réchauffement rapide en journée lorsque l'arbre se trouve au soleil qui entraîne une nécrose cambiale provoquant les dégâts observés.

La seconde phase du projet a permis de montrer que les anomalies de croissance observées n'étaient pas liées à une carence minérale en Bore, contrairement à ce qui avait été observé dans certaines plantations auvergnates.

Outre les impacts sur la qualité des grumes des arbres présentant des décollements d'écorces et des descentes de cimes, l'étude a permis d'évaluer à 1 cm/an la croissance en circonférence des peuplements, valeur très faible qui a été surtout attribuée à leur surdensité (25m²/ha de surface terrière) sans qu'il ait été possible d'évaluer précisément l'impact des anomalies de croissance.

Suite aux différents éléments recueillis, une nouvelle carte de vigilance pour le cèdre a été établie et un certain nombre de préconisations sont formulées pour les futures plantations de cèdre dans le département.

Par ailleurs, deux essais ont été installés dans des peuplements en place présentant des anomalies de croissance pour pouvoir suivre les effets d'opérations de dépressage sur leur état sanitaire à court et moyen termes.

Les résultats obtenus ont été présentés lors d'une journée de restitution qui a rassemblé une quarantaine personnes (gestionnaires privés et publics, conseillers, propriétaires) venues de l'Ardèche mais aussi des départements limitrophes (26, 42, 43, 63, 01, 03). Ils feront par ailleurs l'objet d'articles dans des revues techniques (rédaction en cours).

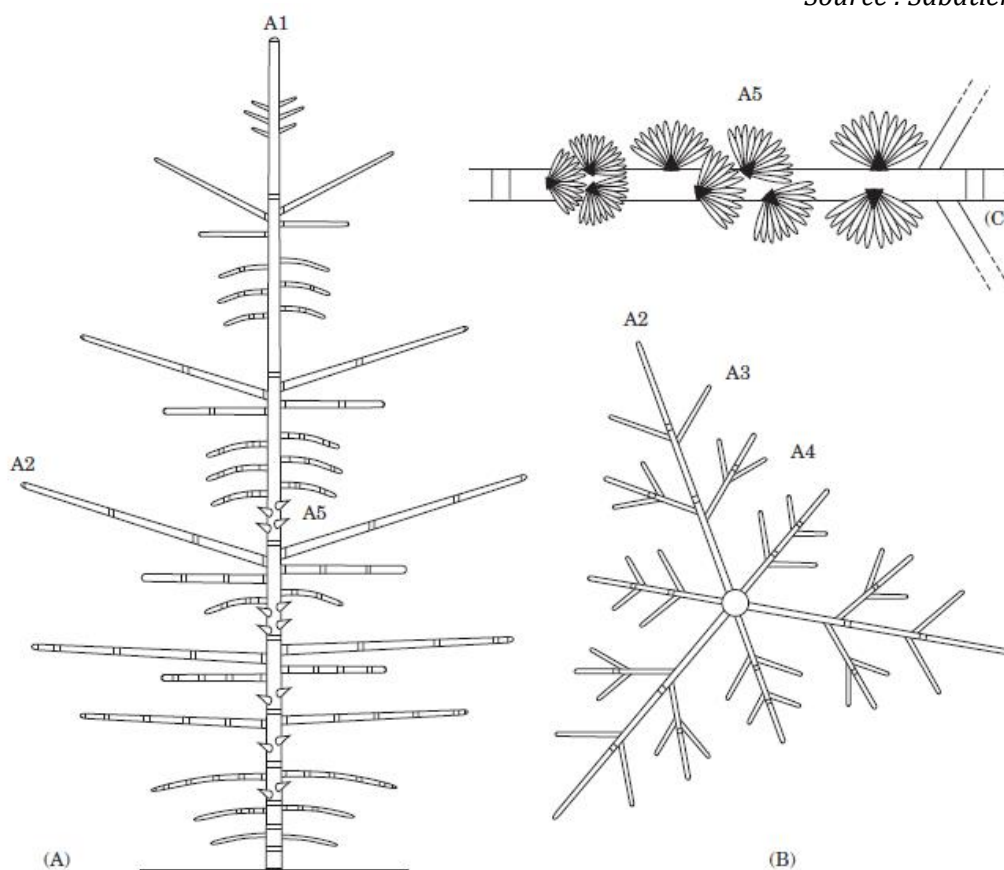
Bien qu'issues d'une problématique soulevée par les acteurs ardéchois du monde forestier, les précisions que ce travail a apporté sur l'autécologie du cèdre de l'Atlas pourront être valorisées au-delà du département de l'Ardèche et en particulier dans d'autres départements de la région Auvergne Rhône Alpes où des phénomènes similaires sont désormais repérés. Plus largement encore, il convient d'intégrer ses éléments dans une réflexion sur le développement de cette espèce sur le territoire français dans un contexte de changement climatique,

Bibliographie

- BONNEAU M., 2002 – Alimentation minérale du Cèdre de l'Atlas, Forêt Méditerranéenne, XXII (1), 3-10.
- CHARRA-VASKOU K., CHARRIER G., WORTMANN R; BEIKIRCHER B., COCHARD H., AMEGLIO Th., MAYR S. 2012 - Drought and frost resistance of trees: a comparison of four species at different sites and altitudes. *Annals of Forest Science* 69: 325-333.
- CHARRIER G., COCHARD H., AMEGLIO Th. 2013 Evaluation of the impact of frost resistances on potential altitudinal limit of trees. *Tree Physiology* 33, 891-902.
- CHARRIER G., NOLF M., LEITINGER G., CHARRA-VASKOU K., TAPPEINER U., AMEGLIO Th., MAYR S. - 2017- Monitoring of freezing dynamics in trees: a simple phase shift causes complexity. *Plant Physiology* 173 (4), 2196-2207.
- COURBET F. et coll. 2012 – Le cèdre en France face au changement climatique : Bilan et recommandation, RMT AFORCE Eds, 30 p.
- DEBAZAC E.-F. 1964. L'arboretum de l'Hort de Dieu. *Ann. Sci. For.* 21, 23-84.
- GIBELIN A.-L., DUBUISSON B., CORRE L., DEAUX N., JOURDAIN J., LAVAL L., PIQUEMAL J.-M., MESTRE O., DENNETIERE D., DESMIDT S., TAMBURINI A., 2014, Evolution de la température en France depuis les années 1950, *La Météorologie* n°87 novembre 2014, pp.45-53.
- HAON J.-M., 1999 – Enquête Dessèchement des pousses de cèdre 1999, Rapport du 14 décembre 1999 de , 3 p.
- LEGRAND Ph., 2003 — Carence en bore de jeunes plantations de Cèdre de l'Atlas dans le Massif central. — *Revue forestière française*, vol. LV, n° 2, pp. 123-128.
- LEGRAND Ph., 2006 — Fertilisation de jeunes Cèdres de l'Atlas carencés en bore dans le Massif central— *Revue forestière française*, vol. LVIII, n° 6, pp. 509-520.
- MILLER P.R., 1993- Abiotic Diseases in Diseases of Pacific coast Conifers Coord. Scharpf R.F., USDA Forest Service eds, Handbook 521, 1-32
- MIRAULT J., REGAD J., 1995 — Le Dessèchement des pousses de Cèdre en Ardèche. In : *La santé des forêts (France) en 1994.* — Paris : Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation – DERF/DSF, pp. 34-35.
- MIRAULT J., REGAD J., 1995 — Le point sur le dessèchement des pousses de cèdre — Rapport du DSF Sud-Est du 21 février 1995, 4 p.
- M'HIRIT O. et BENZYANE M., 2006. Le Cèdre de l'Atlas. *Mémoire du temps.* Éditions La croisée des chemins. 288 p.
- RIPERT C., VENNETIER M., 2002 - Évaluation des potentialités forestières. Guide technique du forestier méditerranéen français, chapitre 2 bis. Éditions Cemagref Antony 2002, 61 p.
- TOTH J., 2001. — Problèmes phytosanitaires et mycorhizes du Cèdre. — PHM – *Revue horticole*, n° 424, pp. 32-36.
- TOTH J., 2005. - Le cèdre de France : Etude approfondie de l'espèce, eds l'Harmattan, 207 p. (les pages 144 à 146 relatent son expérience ardéchoise)

Annexe 2 : Unités architecturales de *Cedrus atlantica*

Source : Sabatier & Barthélémy, 1999



Main stem (A1)	Branches (A2)	Branchlets (A3)	Twigs (A4)	Brachyblasts (A5)
indeterminate growth	long term determinate growth	long term determinate growth	medium term determinate growth	short term determinate growth
rhythmic growth	rhythmic growth	rhythmic growth	rhythmic growth	rhythmic growth
vertical growth direction	horizontal to slanted growth direction	horizontal growth direction	no precise growth direction	no precise growth direction
rhythmic sylleptic and proleptic branching	rhythmic sylleptic and proleptic branching	rhythmic sylleptic and proleptic branching	rhythmic proleptic branching	unbranched
no reproductive structures	no reproductive structures	no reproductive structures	no reproductive structures	terminal male or female cones
spiral phyllotaxis	spiral phyllotaxis	spiral phyllotaxis	spiral phyllotaxis	spiral phyllotaxis

Annexe 3

Détails de la régression logistique (type Foward Logit) ayant permis de construire le modèle de spatialisation des dégâts de cimes sur la parcelle d'Eteize (page 42).

Matrice de confusion						
<i>TOUCHE = présence de déssechement de cime sur la placette</i>						
<i>Non TOUCHE = arbre sain cime sur la placette</i>						
Error rate		0.1239				
Values prediction		Confusion matrix				
Value	Recall	1-Precision		touche	sain	Sum
touche	0.1773	0.3590	touche	25	116	141
sain	0.9846	0.1149	sain	14	894	908
OBSERVE			Sum	39	1010	1049
<p><i>Taux d'erreur en bootstrap = 0.1305</i> <i>ROC CURVE AUC 0.77</i> <i>Qualité du modèle : correct à bon (Critère de ielding et Bell, 1997)</i></p> <p>Touche = arbre présentant soit un port en boule (type 4), cime desséchée (type 3), cime partiellement desséchée (type 2). Sain = arbre sans défgaut de cime</p>						
Attributes in the equation						
Attribute	Coef.	Std-dev	Wald	Signif		
constant	-21.392279	2.2657	89.1502	0.0000		
IKR	19.594690	2.1289	84.7191	0.0000		
distancem	-0.042602	0.0123	12.0439	0.0005		
<p>Positive value = arbre touche (type 2,3 et 4) IKR : indice de climat lumineux de Becker distancem : distance du plant à la bordure la plus proche exprimée en mètre</p>						

Annexe 5 : Suivi photographique à St Laurent du Pape (07)



Auteur : B. Pasturel, CRPF AURA, 2018

Annexe 6 : Suivi photographique du débourrement à Mours St Eusèbe (26)



Auteur : J. Lemaire, IDF-CNPF, 2018