



HAL
open science

Dendroécologie du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill. Ex. Mirb.) : étude d'un bio indicateur des variabilités climatiques dans le massif du Vercors

Sarah Labessoulhe

► **To cite this version:**

Sarah Labessoulhe. Dendroécologie du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill. Ex. Mirb.) : étude d'un bio indicateur des variabilités climatiques dans le massif du Vercors. Biodiversité et Ecologie. 2014. dumas-01112120

HAL Id: dumas-01112120

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01112120>

Submitted on 2 Feb 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master 2 Professionnel « Sciences du territoire »

Mention « Systèmes Territoriaux, Aide à la Décision, Environnement » (STADE)

Dendroécologie du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill. Ex. Mirb.): étude d'un bio indicateur des variabilités climatiques dans le massif du Vercors.

Mémoire soutenu le 01 Septembre 2014

par **Sarah LABESSOULHE**

Devant un jury constitué de :

Directeur de mémoire : M. Jérôme Lopez-Saez (Post-Doc, Irstea, Grenoble – Ecosystèmes Montagnards)

Examineurs : M. Franck Giazzi (Enseignant-Chercheur, Maître de conférences, IGA, UJF - Pacte, Grenoble)

Organisme d'accueil : Irstea (Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture)



Résumé

Dans le cadre du projet CERNES, une étude dendroécologique est menée sur la pinède à crochets du massif du Vercors, en limite de son aire de répartition. 340 pins à crochets (*Pinus uncinata* Mill. ex Mirb.) ont été carottés à travers un axe latitudinal afin d'étudier la relation entre leur croissance et le climat. L'ensemble du protocole d'échantillonnage et du traitement des données ont été réalisés dans le but de faire ressortir le signal climatique et d'atténuer le poids des autres facteurs présents dans les 12 séries dendrochronologiques. Les résultats indiquent que le pin à crochet est un bio indicateur efficace de la variabilité climatique présente sur le massif, spatialement et temporellement. Le calcul des fonctions de réponse simples montre que leur croissance radiale est principalement influencée par les précipitations de juin et de juillet de l'année n . Les conditions climatiques de l'été $n-1$ ont une influence sur leur croissance. Cette relation est confirmée dans le calcul des années caractéristiques : les années où la pinède souffre le plus sont généralement des années où les étés de l'année n et $n-1$ sont arides. Les différences de réponse entre les séries dendrochronologiques indiquent qu'il existe une variabilité climatique entre le nord et le sud du massif. Cette dernière est surtout visible en automne et au printemps. A l'échelle du XXème siècle, les fonctions de réponse mobiles ont permis de démontrer le lien entre la dérive climatique et l'évolution des principaux régresseurs. Alors que sur une majeure partie de la période la croissance radiale est principalement influencée par les précipitations, elles se font en partie remplacées à partir des années 1980 par les températures estivales.

Mots-clés : pin à crochets – dendroécologie – massif du Vercors – variabilité climatique – aridité estivale.

Through the CERNES project, a dendroecology study is carried on the mountain pine forest in the Vercors massif, in the limit of his natural range. Three hundred and forty mountain pines (*Pinus uncinata* Mill. ex Mirb.) has been sample across a latitudinal line to study the relation between growth trees and climate. All the procedure of sample and data processing has been made to bring out the climatic signal and to reduce influence of other factors in 12 dendrochronology series. Results show that mountain pine is a good bio indicator of climate variability on the Vercors Mountains, in a temporal and spatial scale. Correlation functions indicate that ring growth is principally affected by precipitations of June and July on n year. Summer climatic conditions of the $n-1$ year influence their growth. This link is confirmed by Pointer years: years where the mountain pine forest is suffering are principally years where summers of n year and $n-1$ year are arid. Differences between responses of dendrochronology series show the existence of climatic variability between north and south of the Vercors Mountains. This fact is mainly perceptible in autumn and spring. For the 20th century scale, mobiles response functions demonstrate the link between climatic change and mains growth factors evolution. During this period, the ring growth is principally influenced by precipitations. After 1980, temperatures have more influence.

Key-words: mountain pine – dendroecology – Vercors Mountains – climatic variability – arid summer

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes maîtres de stage, Jérôme Lopez Saez et Christophe Corona, qui m'ont permis de finir mes études à travers un sujet passionnant. Merci d'avoir été présent et disponible durant ces cinq derniers mois, malgré vos emplois du temps dignes de ministres. Merci d'avoir partagé vos connaissances et votre passion sur cette magnifique discipline qu'est la dendroécologie. Merci enfin de nous avoir fait confiance, sur le terrain (surtout sur le terrain !) et dans chaque étape de notre stage.

Un grand merci à Monsieur Franck Giazzi, qui a accepté d'être mon tuteur de stage et de faire partie du jury. Merci aussi pour vos nombreux cours auxquels j'ai eu la chance de participer et qui ont apporté beaucoup à mes « bagages » de géographe.

Merci à toute l'équipe de l'Irstea, pour votre disponibilité et votre accueil. Je tiens à remercier tout particulièrement François Veron, Frédéric Berger, Catherine Lukie et Geneviève Nouvellon.

Merci à Pierre-Eymard Biron pour son soutien et sa collaboration au projet CERNES. Merci à Hervé pour sa disponibilité. Merci aux gardes Bruno et Guy, pour votre présence sur le terrain, et nos échanges enrichissants autour d'un panier de cerises. Nous savons maintenant différencier les chamois des chèvres sauvages. Merci aussi aux gardes forestier du Parc Naturel Régional du Vercors.

Merci à Sylvain Bigot, pour nos échanges sur le climat du Vercors. Merci tout simplement pour votre encadrement et vos enseignements le long de ces cinq années à l'Institut de Géographie Alpine.

Une pensée à tous les stagiaires de l'Irstea (cuvée 2014), avec qui j'ai pu échanger sur de nombreux sujets et préoccupations. Adrien, merci pour tes conseils techniques et ta présence. Tu as réussi à nous supporter Clem et moi, et je t'en félicite. Merci Tristan pour ton aide, ta joie de vivre, et ton sens de l'orientation lorsque celui-ci nous faisait défaut. Bonne continuation à Chambéry. Thomas, j'espère que les souvenirs de nos resto U ne passeront jamais à la trappe.

Clémentine, nous avons vécu, dans nos bras, nos jambes et notre tête, la même chose depuis cinq mois. Ce stage restera dans ma mémoire, avant tout comme le début d'une amitié, née de nos pique-niques, nos trajets en voiture, nos galères sur le terrain, et nos longues heures au bureau. Et je te souhaite par la suite de t'épanouir dans ta vie professionnelle, que ce soit en vendant des pizzas ou en grillageant des falaises. Merci d'être toi.

Merci à ma famille. Merci à toutes les personnes qui partagent mon quotidien et qui, avec patience, se sont intéressées à mes études : Mel, mes voisins italiens, Cyril, Julie, Maëlle, Laureline et les autres. Merci aux copains Stade, aux Copains d'Abord. Merci Harley de marcher avec moi.

Merci enfin, à tous ces professeurs, des premières années aux dernières, qui m'ont appris la curiosité, le goût des autres et de l'apprentissage. Monsieur Giuliano, merci.

Sommaire

Résumé	3
Remerciements.....	4
INTRODUCTION	7
Chapitre I : Présentation du projet et des objectifs de l'étude.....	9
1. Le projet CERNES et ses objectifs	9
2. La dendroécologie : intérêts de la méthode	9
2.1 : La dendrochronologie.....	9
2.2 : La dendroécologie	13
3. Présentation du site d'étude et de l'espèce.....	15
3.1 : Géologie et pédologie du massif	16
3.2 : Régime climatique et hydrologie.....	17
3.4 : le pin à crochets :.....	20
Chapitre II : Protocole d'échantillonnage et méthodologies appliquées.....	21
1. Acquisition des données dendrochronologiques.....	21
1.1 : Sélection des sites de prélèvements	21
1.2 : Prélèvement des échantillons	25
1.3 : Préparation des échantillons.....	26
2. Numérisation des données brutes et standardisation	27
1.4 : Interdatation des échantillons.....	27
1.5 : Standardisation des données brutes.....	30
3. Acquisition des données climatiques	31
4. Etude de la relation cerne-climat	33
4.1 : Fonctions de réponse simple.....	33
4.2 : Etude des années caractéristiques	33
4.3 : Fonctions de réponse mobiles.....	34
Chapitre III : Résultats	35
1. Présentation des placettes réalisées.....	35
2. Standardisation des chronologies	38
3. Fonctions de réponse simple.....	41
3.1 : Températures	42
3.2 : Précipitations.....	44
4. Etude des années caractéristiques.....	46

5. Fonctions de réponse mobiles.....	52
5.1 : Echelle temporelle.....	55
5.2 : Echelle spatiale	56
Chapitre IV : Interprétation des résultats.....	58
1. Variations de croissance des séries standardisées.....	58
2. Fonctions de réponse simples	58
3. Années caractéristiques et paramètres climatiques	59
4. Variabilité temporelle des fonctions de réponse	61
5. L'importance des facteurs topographiques et édaphiques.....	62
Conclusion et mise en perspective de l'étude.....	65
1. Perspectives méthodologiques	65
2. Vers une meilleure connaissance du climat alpin	66
3. La pinède à crochets du massif du Vercors	66
Liste des figures	67
Bibliographie.....	70
Annexes	73

INTRODUCTION

Dans nos régions au climat tempéré, les arbres produisent un cerne annuel durant leur période végétative qui commence au printemps et qui se finit à l'automne. Les caractéristiques anatomiques de ce cerne sont en relation directe avec les spécificités naturelles du site, ainsi qu'avec les conditions climatiques et d'autres variables plus ponctuelles (parasites, pratiques agro-forestières, tempêtes, ...). L'étude des cernes des arbres permet d'identifier les principaux facteurs de leur croissance et donc, de mieux connaître l'environnement naturel dans lequel ils évoluent.

Sur l'ensemble du sillon alpin, les composantes environnementales sont fortement influencées par le relief (P. Ozenda, J-L. Borel, 1991). La diversité des milieux conditionnée par l'altitude offre aux scientifiques des espaces riches et variés, où les interactions entre les sphères environnementales sont nombreuses. Le climat est un des principaux paramètres explicatifs de la croissance radiale des arbres. Or aujourd'hui, le changement climatique est une des préoccupations de nos sociétés occidentales, notamment dans les espaces montagnards où les enjeux socio-économiques sont fortement tributaires des aléas naturels.

Entre la fin du XIXème et le début du XXIème les températures moyennes dans les Alpes ont augmenté d'environ 2°C (S. Bigot, S. Rome, 2010). Les scénarios climatiques issus des Modèles Climatiques Régionaux estiment que les températures moyennes annuelles pourraient augmenter de 3°C à 5°C en hiver et de 4°C à 6°C en été d'ici la fin du XXIème siècle (par rapport aux températures du XXème) au sein des Alpes françaises (ONERC, 2008). Au niveau des précipitations, la forte variabilité spatiale et interannuelle implique une interprétation prudente de ces prévisions. Néanmoins, sur une échelle spatiale très fine, l'ONERC prédit une augmentation des précipitations hivernales à l'inverse des précipitations estivales qui devraient diminuer.

Face aux changements, la végétation s'adapte en modifiant son aire de répartition. Durant les dernières glaciations notamment, les migrations furent importantes (P. Ozenda, J-L. Borel, 1991). A l'échelle de sa vie, l'arbre est en revanche contraint de subir ces variations et les stress qu'il supporte sont enregistrés dans ses cernes (Mérian, 2012). On considère ainsi l'arbre comme un bioindicateur de son environnement. La dendroécologie est une des disciplines scientifiques qui étudie ces relations.

Cette étude, qui s'inscrit dans le projet CERNES, a pour vocation d'étudier les relations qu'il peut exister entre les pins à crochets (*Pinus uncinata* Mill. ex Mirb.) du massif du Vercors et les variations climatiques présentes sur cet espace. En d'autres termes, nous allons essayer de définir dans quelle mesure (quand, où et comment) le climat influence la croissance de la pinède afin de savoir si oui ou non cette dernière peut être considérée comme un bioindicateur des variations climatiques à l'échelle du massif. Nous partons de l'hypothèse qu'il existe une variabilité dans la réponse des pins à crochets par rapport à un gradient latitudinal, les placettes réalisées s'étendant sur plus de 40 kilomètres du nord au sud.

L'intérêt de cette étude est pluriel. Dans un premier temps, elle nous permet de mieux connaître la pinède à crochets du massif, élément emblématique de la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors. Bien que quelques études aient été réalisées sur cette pinède auparavant (Rolland, 1995 ; Rolland *et al.*, 1996 ; Hatem, 2010), notre approche dendroécologique à l'échelle du massif est unique. Deuxièmement, la position géographique du site ajoute un intérêt tout particulier. En effet, le Vercors, situé aux portes des Alpes, est à la croisée de trois régimes climatiques : océanique, continental et méditerranéen. Position géographique très intéressante pour étudier la variabilité climatique, puisque c'est dans ce type d'espace qu'elle est la plus sensible (Blanchard, 1918).

Troisièmement, la connaissance du climat antérieur sur ce massif est faible. Etudier la réponse des arbres à ces variations nous permet d'enrichir cette connaissance, à une échelle spatiale et temporelle très précise (les réactions enregistrées par l'arbre se font par rapport au régime climatique présent où il pousse et cette réponse peut se lire à une échelle infra annuelle). Ces informations sont par la suite susceptibles d'enrichir les bases de données nécessaires à la modélisation de scénarios climatiques prévisionnels mais aussi de présager l'évolution future de cette pinède face aux changements climatiques.

Enfin, notre travail se greffe aux études réalisées sur l'ensemble des Alpes et plus globalement sur le territoire européen, où la dendrochronologie sous toutes ses formes est en plein essor. Dans un environnement où tout est connecté, ces chronologies de référence peuvent être utiles dans la compréhension des échanges atmosphériques généraux.

La première partie est consacrée à la présentation de l'étude et à ses objectifs. Une rapide présentation du projet CERNES permet de contextualiser le sujet. La dendroécologie est ensuite présentée ainsi que les principaux travaux réalisés en Europe et plus spécifiquement sur le pin à crochets dans le sillon alpin. *Pinus uncinata* et le massif du Vercors seront présentés afin d'identifier les intérêts que ces derniers apportent à l'étude.

Le protocole d'échantillonnage et les méthodes utilisées seront présentés dans le chapitre II. Viennent ensuite les résultats (chapitre III) et leur interprétation (chapitre IV). Le dernier chapitre abordera ce travail à travers une démarche critique, afin d'identifier les limites et les possibles ouvertures.

Chapitre I : Présentation du projet et des objectifs de l'étude

1. Le projet CERNES et ses objectifs

Le projet **CERNES** (Caractérisation d'Endrochronologique des forêts de pins à crochets dans la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors), financé par le Conseil Général de l'Isère est réalisé par l'Irstea de Grenoble au sein de l'unité Ecosystèmes Montagnards. L'UMR 6042 GEOLAB de Clermont-Ferrand et la Réserve des Hauts -Plateaux du Vercors sont également partenaire du projet. L'objectif est double ; il s'agit dans un premier temps d'étudier la relation entre les séries de croissance des pins à crochets du massif du Vercors et les variations climatiques. Le but est de mieux connaître les facteurs de croissance de cette espèce et de savoir si elle peut être considérée comme un bioindicateur fiable des conditions climatiques du milieu. Ce mémoire est consacré à cette première partie.

Le deuxième objectif est d'utiliser la pinède comme bioindicateur des variations climatiques afin de reconstituer ces fluctuations avec une résolution annuelle. Ce point permet d'enrichir les connaissances en matière de climat passé à l'échelle du massif du Vercors et peut par la suite améliorer les prévisions climatiques des modèles futurs.

2. La dendroécologie : intérêts de la méthode

Chaque année en milieu tempéré et boréal, l'arbre produit un cerne de croissance, « par division péricleine de l'assise cambiale situé à la périphérie de l'organe, sous le tissu cortical » (Lopez Saez, 2011). Chez les conifères en particulier, le cerne présente une structure qui se caractérise par (figure 1) :

(i) un bois initial constitué de rangées de trachéides de couleur claire, de grande taille, à paroi mince, lui conférant une faible densité. Ce bois initial se forme, pendant la période de végétation, au cours du printemps et jusqu'au début de l'été, afin de faciliter le transport de l'eau et des nutriments,

(ii) un bois final formé pendant la période estivale. Ce bois est constitué de rangées de trachéides de couleur sombre, de petite taille, avec une paroi plus épaisse. Cette structure lui confère une densité supérieure qui favorise la stabilité mécanique de l'arbre (Lopez Saez, 2011). La discipline qui étudie les cernes de croissance des arbres et leur variations morphologiques comme archive naturelle des conditions environnementales passées s'appelle la dendrochronologie.

cerne de croissance

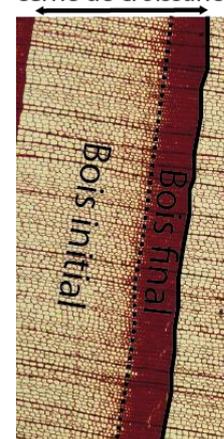
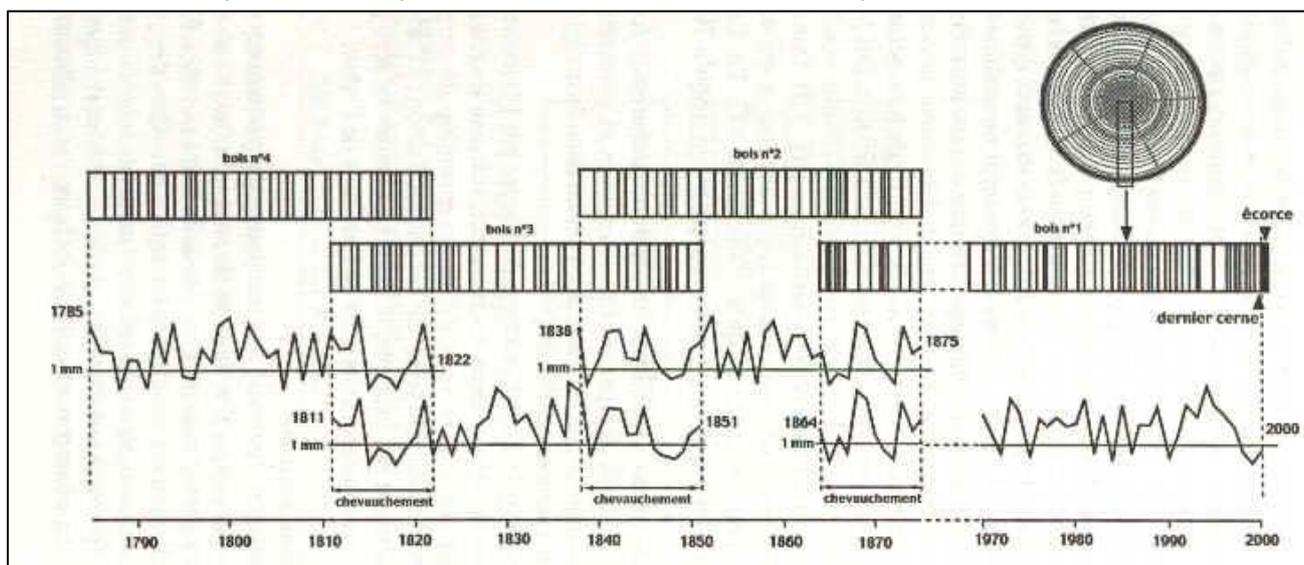


Figure 1 : Présentation des différentes parties d'un cerne de croissance d'un mélèze (source : WSL)

2.1 : La dendrochronologie

La dendrochronologie (du grec « *dendron* », l'arbre, « *chronos* », le temps et « *logos* », la science) est une méthode de datation absolue basée sur l'analyse des cernes de croissance des arbres. Cette discipline a été développée par A. Douglass, qui au début du XXème siècle, a observé une variabilité dans la croissance radiale des arbres entre l'est et l'ouest des Etats-Unis (Payette, 2010). Il a également remarqué que les

cernes minces correspondent aux années de sécheresse et en déduit qu'il existe une relation entre l'anatomie des cernes de croissance et le climat (Payette, 2010). Depuis, les informations contenues dans les cernes de croissance de l'arbre ont été exploitées pour reconstruire les variations des conditions environnementales : calibration des datations carbone (Stuiver *et al.*, 1998 ; Reimer, 2004 ; Hughen, 2004), étude des variations de l'activité solaire (Solanki, 2004), reconstitution de l'historique des feux de forêts en Suède (Niklasson, 2000) ou encore étude des fluctuations glaciaires en Suisse depuis 3500 ans (Holzhauser, 2005). La dendrochronologie permet d'obtenir des informations très précises dans le temps et dans l'espace, sur des périodes pouvant remonter sur plusieurs milliers d'années.



La dendrochronologie repose sur l'établissement d'une chronologie de référence (figure 2). Cette chronologie permet d'établir une interdatation (synchronisation) entre plusieurs échantillons, permettant ainsi d'attribuer à chaque cerne l'année exacte de sa formation (Fritts, 1976). Les prélèvements sur bois vivants permettent dans un premier temps de reconstituer la partie la plus récente de la série. Ensuite l'utilisation de bois morts (excavés de sites archéologiques ou du sol) permet la reconstitution des parties les plus anciennes. La dendrochronologie repose sur quatre principes fondamentaux (Lebourgeois, 1998 ; Mérian, 2010) :

Le principe d'uniformité :

Les facteurs physiques et biologiques expliquant la croissance des arbres sont les mêmes à l'échelle temporelle. Les réactions anatomiques par rapport à ces facteurs sont donc identiques et peuvent être analysées de la même manière dans le passé, le présent et le futur.

Le principe du facteur limitant :

La croissance d'un arbre ne peut dépasser le seuil fixé par le facteur le plus limitant présent sur son espace. Un cerne est le produit d'une combinaison de facteurs environnementaux favorisant ou non sa croissance. Le facteur le plus important limitant son anatomie explique dans la majeure partie sa morphologie. Ce facteur limitant est susceptible de changer dans le temps, en relation avec l'évolution des conditions environnementales.

Le principe de l'amplitude écologique :

Pour qu'une espèce végétale soit présente sur un espace, elle doit y trouver l'ensemble des conditions biotiques et abiotiques nécessaires à sa croissance. Cette surface que l'on appelle « aire de répartition » est différente selon les besoins de chaque espèce. Sur une échelle de temps longue, les végétaux vont s'adapter en modifiant leur aire d'implantation, créant des « phénomènes massifs de colonisation et de mortalité aux marges des aires de répartition » (Mérian, 2010) ou en subissant des modifications génétiques à long terme. A l'échelle décennale, les aires de répartition varient peu et ce sont les individus situés en limite de leur aire qui sont alors les plus susceptibles d'enregistrer ces modifications. Ces stress se traduisent par un ajustement de leur cycle annuel de croissance, en fonction des variations interannuelles du climat mais aussi par rapport à des tendances aux échelles de temps plus longues, appelées dérive climatique (comme par exemple le réchauffement qui a lieu depuis le début des années 1980).

Le modèle linéaire de croissance :

Trois facteurs principaux influencent la croissance de l'arbre : l'environnement, l'âge et l'hérédité (Zobel et Van Buijtenen, 1989 ; Payette, 2010). Au niveau de l'hérédité, ce paramètre reste limité, « environ 20% de la variation de la croissance en hauteur et en diamètre serait sous le contrôle génétique » (Payette, 2010). Les deux autres paramètres ont quant à eux plus d'importance. Cook (1987) propose une synthétisation des facteurs de croissance à travers une formule mathématique, communément utilisée aujourd'hui en dendroécologie :

$$R^t = A^t + C^t + \delta D 1^t + \delta D 2^t + E^t$$

R^t = la série de cernes observés,

A^t = la tendance d'âge,

C^t = le signal climatique,

$\delta D 1^t$ = les perturbations endogènes et les perturbations locales,

$\delta D 2^t$ = les perturbations exogènes à l'échelle du site,

E^t = l'ensemble de la variabilité interannuelle non expliquée et non reliée aux autres signaux

D'une manière générale, lorsque l'on observe la géométrie des cernes de l'écorce jusqu'au cœur, on s'aperçoit que les cernes sont de plus en plus petits au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'écorce. Ce phénomène est la tendance d'âge et se rapporte au fait que pour une même quantité de bois produite chaque année, la surface à recouvrir est de plus en plus importante au fur et à mesure que l'arbre grossit. En conséquence, le cerne diminue en épaisseur.

Le signal climatique correspond aux variations de croissance en relation avec les facteurs environnementaux communs à tous les arbres, c'est à dire le climat mais aussi les interactions entre ce dernier et les conditions écologiques locales.

La tendance d'âge, le signal climatique et la variabilité non expliquée (E^t) sont présents tout au long de la série et sont variables dans le temps. En revanche, les perturbations endogènes (liées aux caractéristiques de la population mais indépendantes de leur environnement : sénescence des arbres dominants, sylviculture,...) et exogènes (feux, attaques parasitaires,...) se manifestent ponctuellement dans la série en fonction de leur occurrence. Mérian (2012) propose un tableau récapitulatif l'ensemble des facteurs influençant la largeur de cerne (figure 3) :

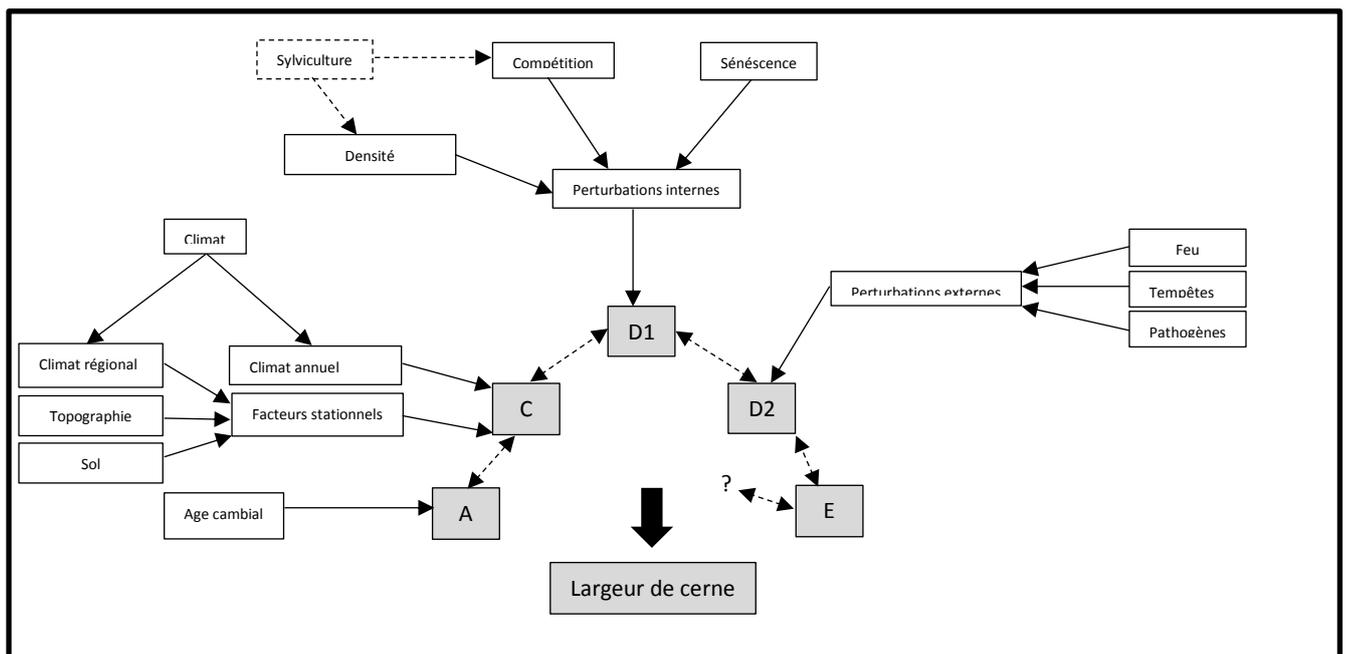


Figure 3 : Schéma simplifié des facteurs naturels et de leurs interactions influençant la croissance radiale (d'après Mérian, 2012)

Les domaines d'applications étant nombreux, la dendrochronologie s'est divisée en plusieurs sous-disciplines. Bien qu'elles gardent les principes de base de la dendrochronologie, chacune d'elle développe des techniques de mesures adaptées au but de sa recherche.

dendrochronologie	dendroarchéologie	Datation des constructions archéologiques
	dendroclimatologie	Reconstitution du climat
	dendrogéomorphologie	Reconstitution des processus géomorphologiques
	dendrohydrologie	Reconstitution des écoulements hydrologiques anciens
	dendronivologie	Reconstitution des épisodes neigeux et des événements extrêmes (avalanches,...)
	dendrogéochimie	Etude des variations chimiques dans l'atmosphère
	dendroanthracologie	Etude du charbon afin de reconstituer des épisodes de feux de forêts
	dendroécologie	Etude des variations de croissance par rapport au milieu naturel

2.2 : La dendroécologie

La dendroécologie se rapporte à « l'étude des relations spatio-temporelles entre les végétaux ligneux et leur habitat qui déterminent leur répartition et leur abondance » (Payette, 2010). Cette discipline se concentre sur l'étude des caractéristiques de la croissance radiale des arbres afin de déterminer les influences extrinsèques agissant sur son développement. Elle est aujourd'hui couramment utilisée dans l'étude des relations entre les espèces ligneuses et la variabilité climatique car elle possède de nombreux avantages :

- Elle permet une analyse des paramètres climatiques à une échelle spatio-temporelle très fine,
- Elle possède une méthodologie précise facile à réitérer sur divers espèces végétales et sur des terrains aux conditions topographiques et édaphiques très différentes,

Les progrès scientifiques ont permis à cette discipline de se développer fortement depuis une vingtaine d'années, principalement en Amérique et en Europe. Les relations entre l'arbre et son environnement étant nombreuses, les études réalisées en dendroécologie sont riches et variées. Cependant, elles se concentrent pour beaucoup sur l'impact des variations climatiques (Rolland *et al*, 1995 ; Mérian, 2012 ; Rita *et al.*, 2014 ; Meier *et al.*, 2014). Certaines études mettent en avant des relations climatiques précises, comme les sécheresses (Eilmann, 2009) ou essaient de prévoir les évolutions de croissance par rapport à des prévisions climatiques (Keller *et al.*, 2000). Le rôle des facteurs *in situ* dans la croissance radiale est largement abordé (Rolland *et al.*, 1995 ; Shueller *et al.*, 1995) et certaines se concentrent sur des phénomènes précis comme les attaques parasitaires (Morin *et al*, 2012, Filion *et al.*, 2012), la fréquence et l'intensité des feux (Bergeron, 1991), la déclinaison d'une espèce (Abrams, 2003), l'impact des variations climatiques sur la canopée d'une forêt (Nowacky , 1997) ou sur la reforestation (Kitzberger, 2000).

Les sites étudiés sont principalement localisés en Amérique du Nord notamment au Québec (Bergeron, 1991 ; Payette, 2012) et aux Etats-Unis (Nowacky, 1997). Des travaux ont aussi été réalisés en Patagonie (Veblen, 1999 ; Kitzberger, 2000). Dans les Alpes, les études sur la relation cerne-climat sont nombreuses (Rigling, 2001 ; Eilmann, 2009) et la variabilité inter-espèce est souvent prise en compte (Keller *et al*, 2000 ; Carrer *et al.*, 2004 ; Meier *et al.*, 2014 ; Rita *et al.*, 2014).

Notre étude porte sur la relation entre la croissance des pins à crochets du massif du Vercors et la variabilité climatique présente sur cet espace. Elément emblématique du Vercors, le pin à crochets est une espèce particulièrement intéressante à étudier. En effet il se situe à la limite occidentale de son aire de répartition à l'échelle de l'Europe (figure 4), ce qui fait de lui un bioindicateur potentiel des variations climatiques (Rolland, 1996). Il est de plus peu influencé par les conditions pédologiques et édaphiques de son milieu ce qui tend à réduire leur poids dans l'interprétation des largeurs de cernes.

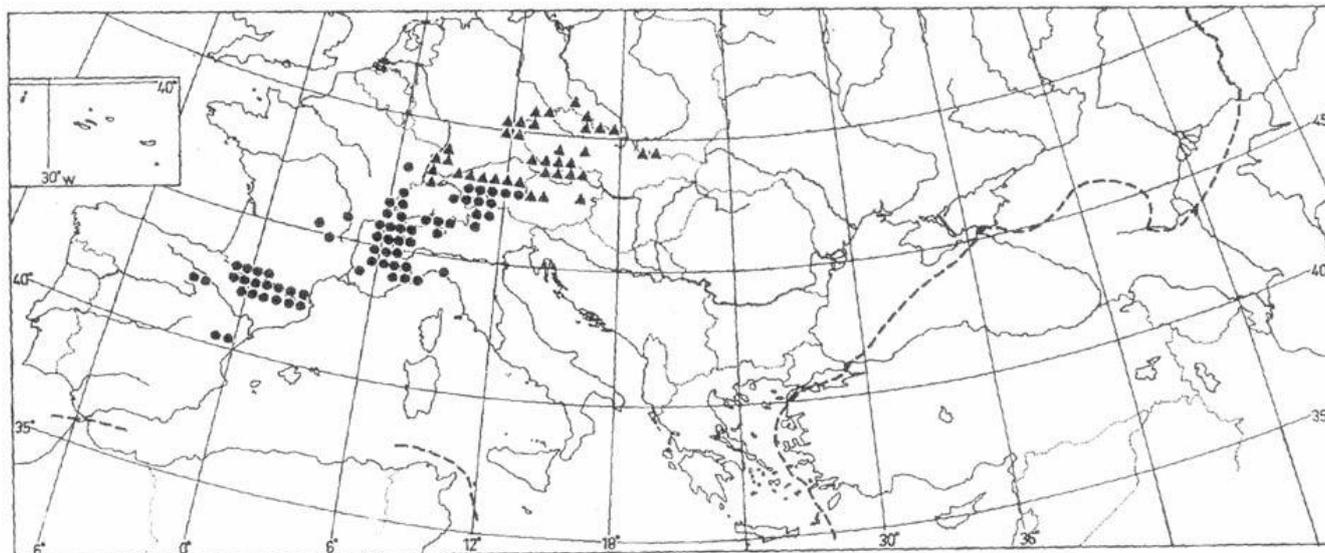


Figure 4 : Aire de répartition de *Pinus uncinata* Mill. Ex Mirb. (Atlas Florae Europaeae, 1973)

Des études dendroécologiques ont déjà eu lieu sur cette espèce, dans les Alpes (Rolland *et al.*, 1995 ; Rolland, 1996 ; Petitcolas, 1998 ; Handa, 2006 ; Lebourgeois *et al.*, 2012) et dans les Pyrénées (Shueller *et al.*, 1995 ; Tardif, 2003 ; Batllori *et al.*, 2008). Rolland (1996) a notamment étudié l'espèce sur le massif du Vercors, mais seulement d'un point de vue local (Rolland *et al.*, 1995 ; Rolland, 1996). Petitcolas (1998) a également comparée différentes réactions du pin à crochets dans les Alpes françaises. L'ensemble des travaux s'accordent à dire que le pin à crochet est un bioindicateur efficace des variabilités climatiques (Shueller *et al.*, 1995 ; Rolland *et al.*, 1995 ; Rolland, 1996 ; Tardif, 2003 ; Lebourgeois *et al.*, 2012).

Les modifications des milieux liées aux changements climatiques sont susceptibles d'être enregistrées en premier lieu dans des territoires confrontés à la rencontre de plusieurs régimes. Le pin à crochets étant fortement présent sur le Vercors, il semble pertinent de l'utiliser ici afin d'étudier ces variations à différentes échelles spatiales et temporelles.

3. Présentation du site d'étude et de l'espèce

Le massif du Vercors est situé à l'étage subalpin dans les Alpes externes humides. Il se situe à proximité du massif de la Chartreuse, de Belledonne et du Dévoluy (figure 6).

D'une superficie de 206 000 hectares (65 km du nord au sud, 35 km d'est en ouest), c'est le plus grand massif des Préalpes françaises. A cheval entre le département de l'Isère au nord et de la Drôme au sud, il fut classé comme Parc Naturel Régional en 1970 (figure 5).

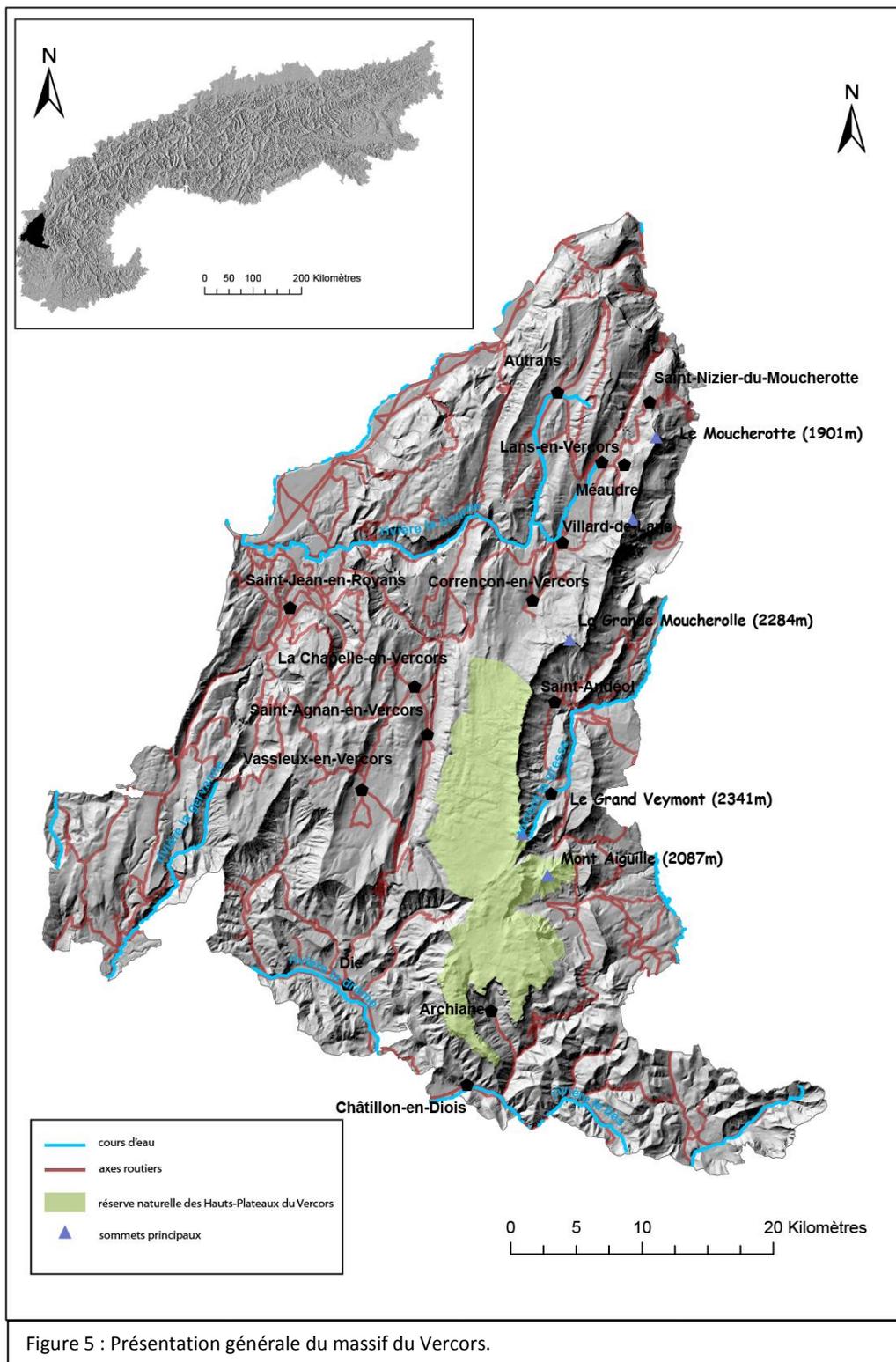


Figure 5 : Présentation générale du massif du Vercors.

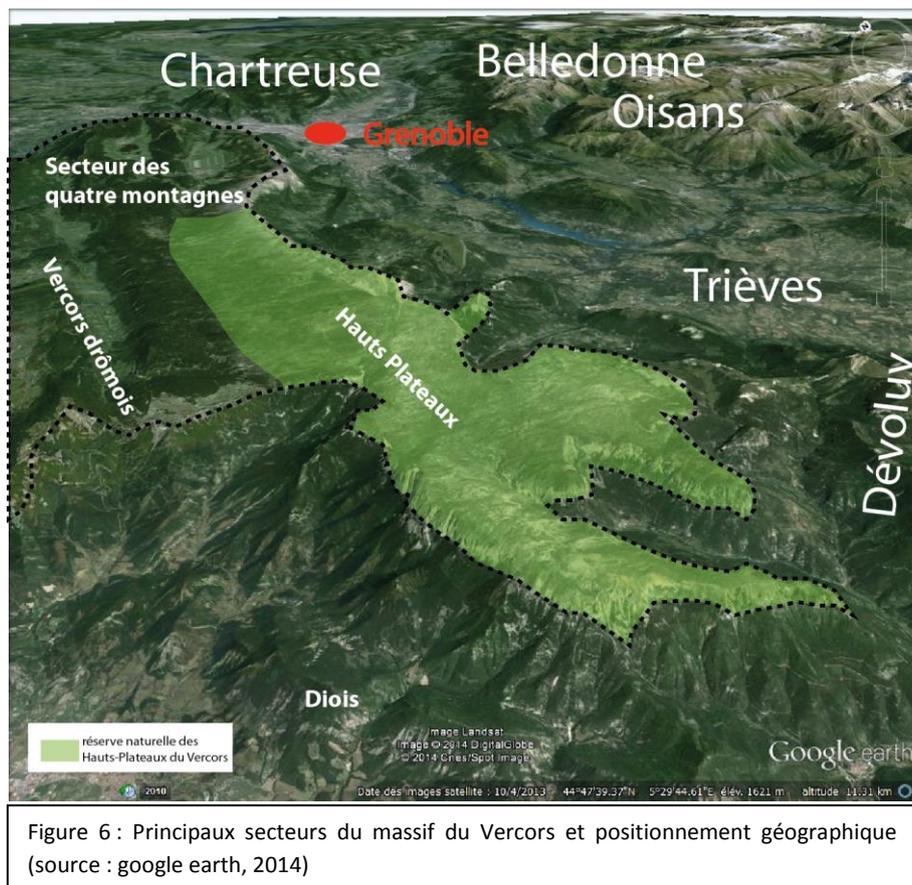


Figure 6 : Principaux secteurs du massif du Vercors et positionnement géographique (source : google earth, 2014)

En 1985, alors que le développement des stations de ski est en plein essor, une réserve naturelle a été créée aux altitudes les plus hautes du massif, afin notamment de protéger ce patrimoine naturel des infrastructures touristiques (axes routiers, pylônes, pistes de ski,...). S'étalant sur une surface de 17 000 hectares, elle est aujourd'hui la plus grande réserve métropolitaine (figure 5 et figure 6). Surnommée la « petite Laponie », cette partie du Vercors reste encore peu fréquentée du fait de son accès difficile et de son climat rigoureux. Des activités sylvicoles et pastorales ont cependant toujours lieu afin de préserver le paysage actuel hérité de ces pratiques saisonnières. Son cadre naturel exceptionnel attire de plus en plus un public attiré par cet espace protégé, situé à proximité de grands pôles urbains tels que Grenoble ou Valence.

3.1 : Géologie et pédologie du massif

Un massif karstique

Le massif du Vercors est composé de roches sédimentaires calcaires et marneuses, qui se sont formées il y a 150 millions d'années alors que cet espace était occupé par un bassin issu de l'étirement de la plaque continentale européenne.

Lors de la formation des Alpes, ces roches se sont soulevées et déplacées vers l'ouest sous l'action de deux plaques tectoniques en collision. Ce déplacement est à l'origine des plissements et des failles visibles aujourd'hui sur le massif, créant un relief ondulé d'anticlinaux et de synclinaux organisés d'est en ouest. La surface topographique est conforme à la géologie, avec peu de reliefs marqués sur le haut du massif (Etat des lieux de la RNHPV, 2010).

A la fin de l'ère tertiaire, des phénomènes d'érosion ont fini de modeler le paysage, notamment durant les périodes de glaciation du Quaternaire où la cryoclastie et les écoulements sont à l'origine de la nature

karstique de la roche. Cette dissolution des roches carbonatées par l'eau a donné naissance aux dolines et aux lapiaz, bien présents au niveau de la réserve (20% des Haut-Plateaux sont occupés par ce type de formation). Ce microrelief est accentué par l'héritage des actions d'une ancienne calotte polaire qui a donné naissance à un fjell sur les Hauts-Plateaux. Un important réseau karstique procure au massif la particularité de laisser l'eau s'infiltrer.

Cet héritage géologique particulier est un des éléments fondamental du patrimoine du Vercors (le lapiaz est notamment classé par Natura 2000 comme habitat d'intérêt communautaire prioritaire) et joue un rôle important dans la nature des espèces et des activités présentes sur le territoire. Il impacte l'origine de la nature du sol et des végétaux et joue un rôle majeur dans notre étude.

Une mosaïque de sols et de milieux

Les composantes végétales ainsi que la nature de la roche mère et son altération sont les principaux facteurs expliquant la nature du sol. Les processus d'altération de la roche et la nature de la végétation dépendent de la topographie et de l'altitude. La nature du sol est particulièrement variée sur le haut massif du Vercors, du fait de son microrelief accentué. On retrouve ainsi à échelle décimétrique des sols squelettiques sur les hauts des microreliefs et des sols plus riches dans les dépressions. Il est absent sur les lapiaz et éboulis, où la pente est forte. Dès que celle-ci diminue, on y trouve des rendzines et des sols plus épais là où la végétation est présente. Cependant, au-dessus de 1600 mètres aux étages subalpins et alpins, la prépondérance des résineux donne à ce sol un caractère acide, accentuant l'érosion du substratum.

3.2 : Régime climatique et hydrologie

Bien que le sommet du Vercors ne se trouve qu'à 2341 mètres, son relief le classe au niveau de l'étage subalpin où les influences montagnardes sont bien présentes d'un point de vue climatique. Situé à plusieurs centaines de kilomètres des littoraux, les courants atmosphériques lui apportent des influences méditerranéennes et océaniques, d'autant plus qu'il est situé au niveau de l'extrême partie orientale du sillon alpin. Le climat du Vercors est de manière générale frais et humide. Cependant, pas ces différentes influences, il existe une variabilité spatiale des conditions atmosphériques, plus marquée au niveau des précipitations, variable fortement anisotrope spatialement (Bigot *et al.*, 2010).

Précipitations

Sur l'ensemble du Vercors, les précipitations moyennes annuelles varient entre 1200 et 1800 mm (Rousset, 1982 ; Delannoy, 1986). Les données interpolées issues de Histaalp donnent une amplitude de 1000 à 1450 mm par an (moyenne 1961-1990). Ce sont aux altitudes les plus hautes que les précipitations sont les plus importantes (figure 7 et 8). Bien qu'on retrouve les plus faibles totaux pluviométriques dans le Diois où les influences méditerranéennes sont les plus marquées, la répartition des précipitations est principalement expliquée par le relief.

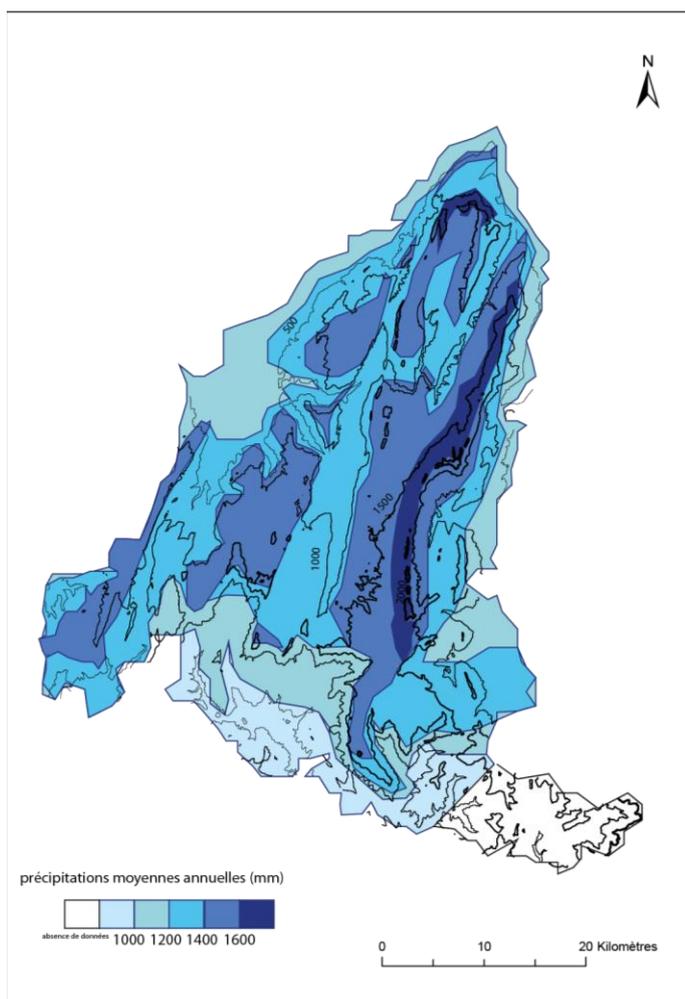


Figure 7 : Carte simplifiée des précipitations moyennes annuelles (d'après la carte des régions bioclimatiques, Delannoy, 1986).

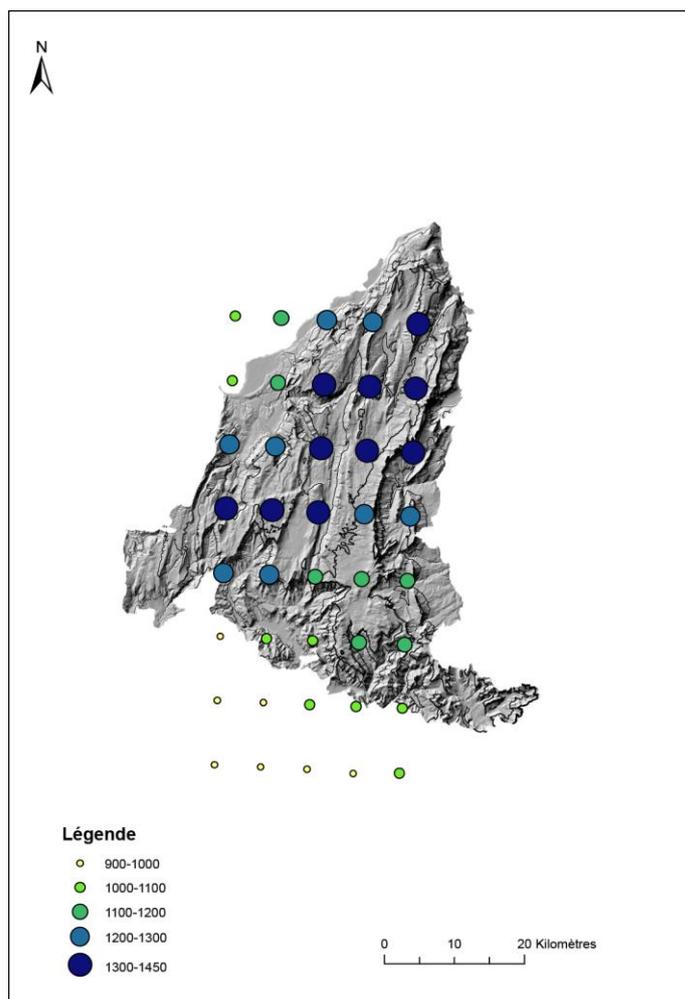
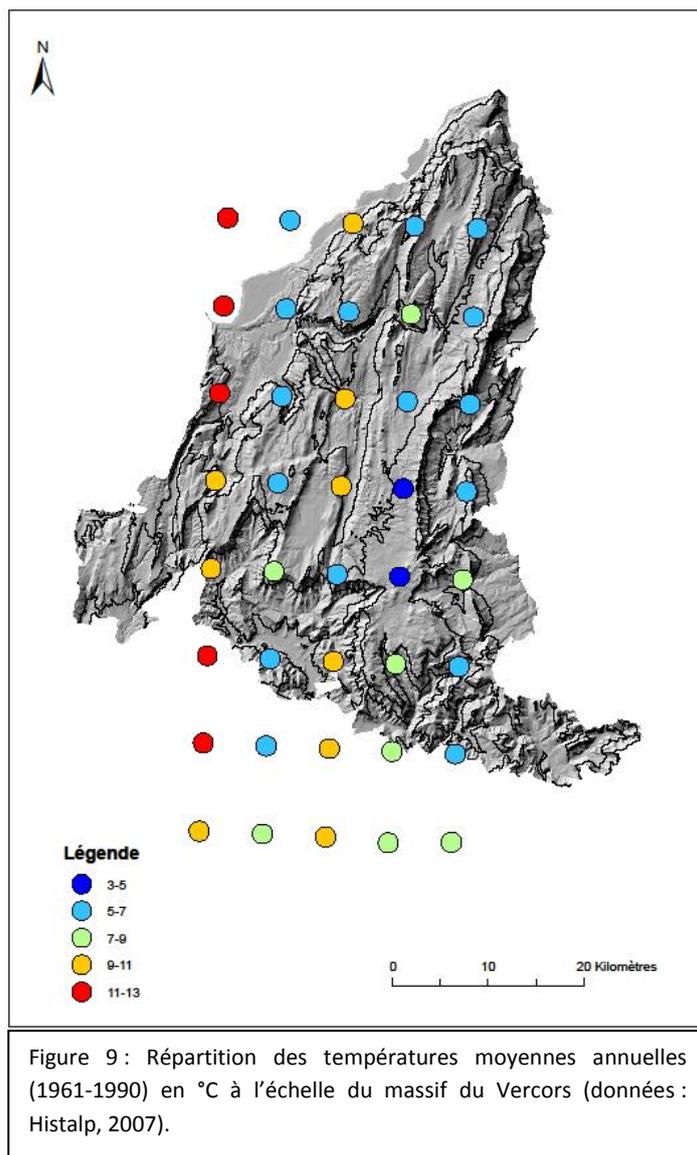


Figure 8 : Répartition des précipitations moyennes annuelles (1961-1990) en mm à l'échelle du massif du Vercors (données : Histalp, 2007).

Températures

A l'échelle du Vercors la température moyenne annuelle est inférieure à 5°C (Delannoy, 1991). Comme pour les précipitations, le relief est le principal facteur des disparités spatiales au niveau des températures (figure 9). Aux altitudes les plus hautes, c'est-à-dire sur les Hauts-Plateaux et notamment vers le Grand Veymont, les températures moyennes annuelles oscillent entre 3 et 5°C. Entre 1000 et 1500 mètres, elles sont comprises entre 5 et 7°C. Au-dessous de 1000 mètres elles avoisinent les 10°C, allant même jusqu'à 13°C vers Saint-Marcellin.



Saisonnalité du climat sur le massif du Vercors

Bien que l'été soit moins arrosé et l'automne plus humide, les précipitations sont bien réparties sur l'ensemble de l'année. Les températures moyennes mensuelles sont négatives en hiver (-0.4°C) et avoisinent les 15°C en été. Aux altitudes les plus élevées, au niveau du Grand Veymont et au centre des Hauts-Plateaux, la température moyenne hivernale est de -3.2°C. Sur les Hauts-Plateaux, le nombre de jours de gel par an est d'environ 142 (Rolland *et al.*, 1995).

3.4 : le pin à crochets :

Le pin à crochets (*Pinus uncinata* Miller ex. Mirbel) est un conifère de la famille des Pinacées. Orophile, il pousse à des altitudes comprises entre 1600 mètres et 2200 mètres. Survivant de l'ère glaciaire, on le retrouve principalement dans les Pyrénées et dans les Alpes. Il supporte aussi bien le froid, le gel et la luminosité d'altitude que la sécheresse et le vent. Frugal, il supporte n'importe quel type de sol, ce qui fait qu'on le retrouve dans des milieux écologiques très variés, des tourbières aux pentes abruptes et nues du Vercors (figure 10).

La concurrence inter espèce est son principal facteur limitant. C'est pourquoi il s'observe principalement dans des milieux délaissés par les autres essences.

Espèce monoïque, il peut vivre jusqu'à 500 ans. Sa croissance est faible et sa taille adulte varie entre 10 et 25 mètres au maximum. On le distingue des autres Pinacées par ses aiguilles regroupées par deux (mesurant entre 4 et 8 cm) et par ses cônes, dissymétriques et munis de petits crochets.



Figure 10 : *Pinus uncinata* dans le massif du Vercors (source : Labessoulhe, 2014).

Chapitre II : Protocole d'échantillonnage et méthodologies appliquées

1. Acquisition des données dendrochronologiques

1.1 : Sélection des sites de prélèvements

L'échantillonnage sur le terrain constitue la première étape d'une étude dendrochronologique. Le choix du ou des emplacements prélevé(s) doit être fait avec soin car il conditionne par la suite l'ensemble des résultats et des interprétations (Payette, 2010). Trois grands axes ont orientés notre sélection.

L'altitude

12 placettes ont été réalisées entre le mois de mai et de juin 2014. Ces placettes sont positionnées sur la partie orientale du massif à travers un axe latitudinal. Le prélèvement d'échantillons sur plusieurs placettes permet de faire ressortir le signal climatique et de diminuer le poids des facteurs locaux dans le signal dendrochronologique (Mérian, 2012). Les placettes ont été positionnées volontairement sur un axe nord-sud afin de savoir s'il existe un gradient latitudinal dans la réponse des arbres au climat à l'échelle du massif du Vercors.

Dans un premier temps, les pins à crochets ont été localisés. Le Vercors étant un massif situé à l'étage subalpin, les terrains situés à plus de 1700 mètres sont peu nombreux (figure 11). Le choix de cette valeur altitudinale est basée sur l'étude des préférences physiologiques de l'espèce (rappelons que le pin à crochets se situe à des altitudes comprises entre 1600 et 2200 mètres) et a été surélevée d'une centaine de mètres afin d'éviter toute concurrence inter-espèces, notamment avec l'épicéa. En effet, le facteur le plus limitant du pin à crochets étant la concurrence, il ne s'épanouit dans le massif du Vercors qu'aux altitudes les plus élevées, où les conditions pédologiques limitent la présence d'espèces ligneuses plus exigeantes (Rolland, 1996).

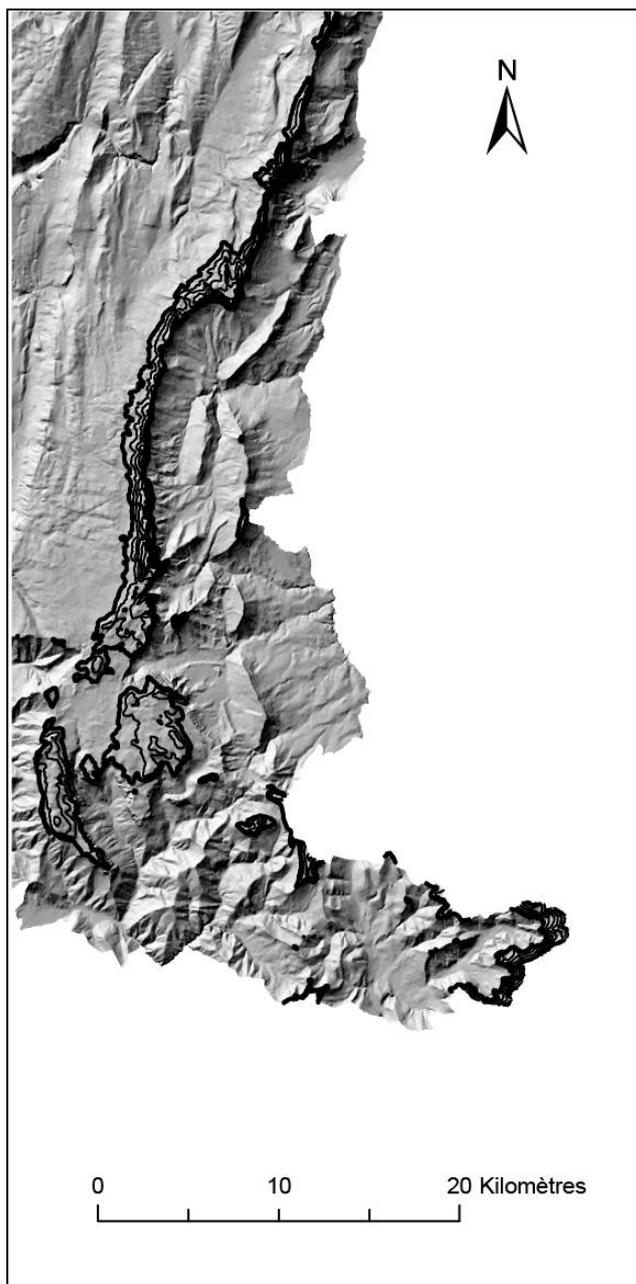


Figure 11 : Représentation cartographique des parties du massif du Vercors situées à plus de 1700 mètres d'altitude.

La carte simplifiée des régions bioclimatiques du Vercors (Delannoy, 1986) a permis également de valider l'hypothèse que la pinède du massif du Vercors était principalement située aux altitudes les plus hautes (annexe 1).

L'âge potentiel des peuplements

Un échantillonnage sur des vieux peuplements est privilégié. D'une part parce qu'il permet d'éviter l'influence des processus physiologiques propres aux arbres juvéniles, d'autre part parce que l'étude de la relation cerne-climat dans le temps est plus intéressante sur des peuplements âgés (Mérian, 2012). Il permet aussi aux gestionnaires de la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du

Vercors de mieux connaître la pinède à crochets et d'identifier les secteurs où celle-ci est la plus vieille. Un travail relatif à ce sujet a déjà été réalisé par Hatem (2010) à l'échelle de la Réserve, mais uniquement à partir d'une analyse diachronique de documents cartographiques, sans validation sur le terrain. Ces cartes (annexe 2) nous ont cependant permis d'orienter le choix de nos emplacements sur les Hauts-Plateaux (figure 12).

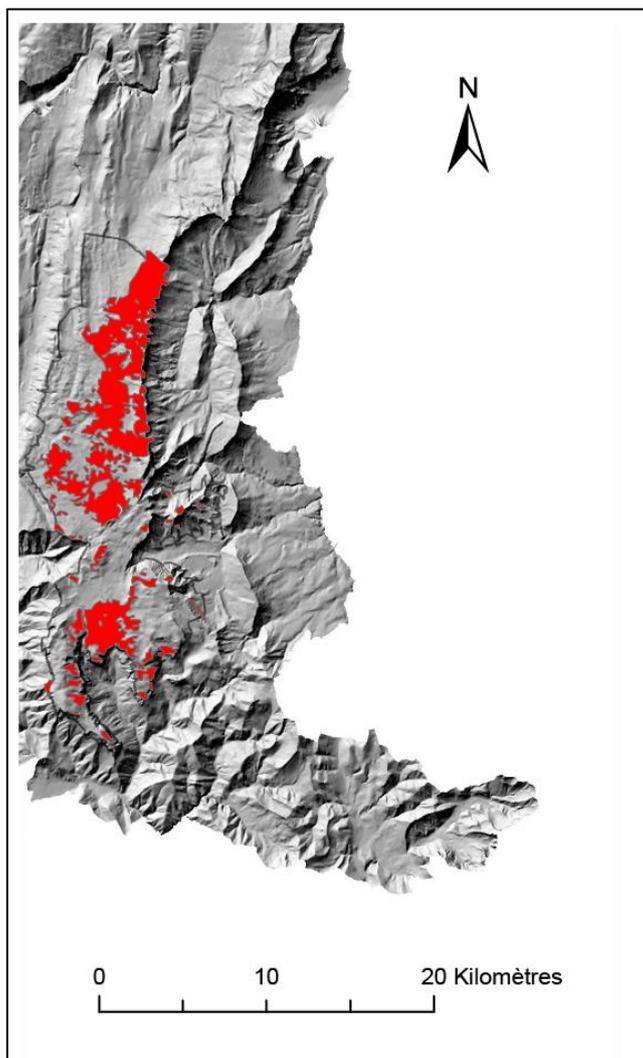


Figure 12 : Emplacement géographique de la vieille pinède à crochets sur la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors (d'après Hatem, 2010).

A l'échelle du massif, une analyse diachronique des photographies aériennes de 1948 a permis de valider les secteurs prédéfinis et d'accentuer les chances d'échantillonner des individus centenaires. (figure 13).

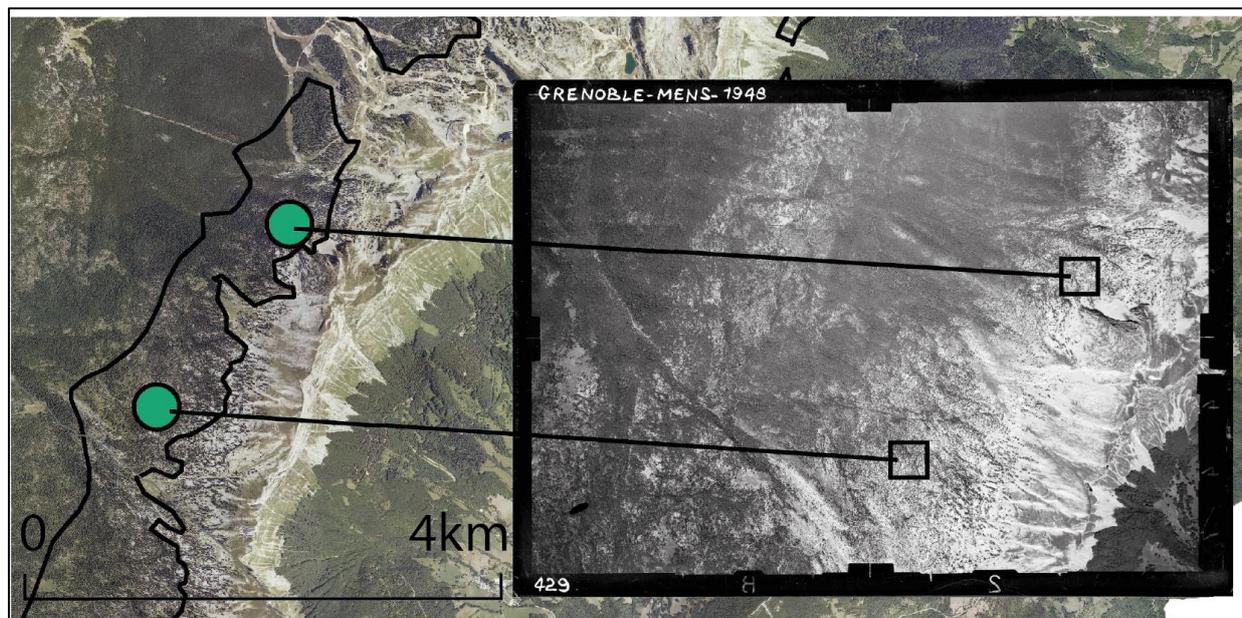


Figure 13 : Analyse diachronique des surfaces arborées aux altitudes les plus hautes du massif du Vercors à partir des photographies aériennes de la campagne de 1948.

Topographie et type de sol

Les propriétés physico-chimiques du sol jouent un rôle important dans la croissance des arbres (Payette, 2010 ; Mérian, 2012). Afin de réduire leurs interférences au sein du signal, nous avons privilégié des placettes homogènes, afin de pouvoir étudier au mieux la variabilité spatiale d'un point de vue climatique. Géologiquement, les conditions sont relativement semblables à l'échelle du massif (Rolland *et al.*, 1995). En revanche, le sol est varié (voir Ch.1.3.1.2). Afin de sélectionner les arbres les plus susceptibles d'enregistrer les variations climatiques, les placettes ont aussi été choisies en fonction de la nature du sol :

- Les lithosols superficiels ont été privilégiés car seuls les arbres résistants tel que le pin à crochets peuvent y survivre (Rolland *et al.*, 1995). De plus, ils ne leur permettent pas de réaliser d'importantes réserves hydriques lors d'épisodes de sécheresse : leur réponse au climat en est accentuée.
- Les dépressions ont été évitées car elles sont susceptibles de retenir plus longtemps les eaux d'écoulement et surtout la neige au printemps, réserve d'eau appréciable lors de la période végétative.

Sachant que les deux premiers paramètres (l'altitude et l'âge potentiel des peuplements) ont fortement diminué la surface du massif qui présente un intérêt dendrochronologique, les facteurs topographiques et édaphiques ont été pris en compte directement sur le terrain. De manière générale, les parties les plus hautes sont fortement occupées par des sols pauvres et des lapiaz (figure 14).



Figure 14: Vue sur les sommets orientaux du Vercors (photo orientée nord) depuis le Pas Morta (source : Labessoulhe, 2014).

Afin d'éviter les zones où la rétention d'eau dans le sol est importante, les zones de pente ont été privilégiées. Les arbres présents dans les micro-dépressions du fjell ont été écartés.

Notons que l'exposition joue aussi un rôle dans la croissance radiale du pin à crochets (Shueller, 1995) mais que celle-ci étant semblable sur les parties hautes du massif, elle a peu été prise en compte dans le choix de nos emplacements.

1.2 : Prélèvement des échantillons

Sélection des arbres échantillonnés

Les arbres les plus représentatifs du peuplement ont été choisis, en évitant ceux comportant des blessures pouvant perturber leur croissance (étêtage, branches cassées, marques sur le tronc,...). Les arbres dominants ont été privilégiés, car ils sont moins susceptibles d'enregistrer des variations de croissance liées à la concurrence de leurs voisins, variations pouvant perturber le signal climatique dans la chronologie (Mérian, 2012).

Choisir les arbres les plus vieux reste difficile, car « les arbres les plus vieux ne sont pas nécessairement les plus grands et sont souvent de dimension modeste et poussent dans les habitats marginaux au sol sec, dénudé et pierreux » (Payette, 2010).

Echantillonnage des individus

30 arbres en moyenne ont été échantillonnés pour chaque placette. Ce seuil permet une représentativité optimale de la chronologie face à sa réponse au climat. Il permet également de

diminuer fortement les variations de croissance liées aux caractères génotypiques et aux effets de site (Lebourgeois *et al.*, 2012). Des carottes sont prélevées à l'aide d'une tarière de Pressler. Cette méthode a l'avantage d'être peu destructrice, en particulier pour les résineux (Payette, 2010). Un baume cicatrisant est appliqué pour chaque prélèvement afin de réduire au maximum tout risque de dommages.

Les carottes sont réalisées perpendiculairement à la pente au plus proche du sol afin d'obtenir les séries de cerne de croissance les plus longues possibles. Deux carottes sont prélevées sur chaque individu (figure 18).

Chaque arbre est identifié par un numéro. Ses coordonnées GPS sont relevées ainsi que divers informations susceptibles de nous renseigner sur des particularités de croissance lors de l'interdatation (pente, sol, présence d'arbre mort,...).

1.3 : Préparation des échantillons

Le collage



Figure 15: collage des carottes sur bois rainurés (source : Labessoulhe, 2014).

Sur le terrain, les carottes sont conditionnées dans des pailles en plastique. Une fois retirées, elles sont collées sur des planches en bois rainurés (figure 15). A noter que les échantillons sont collés de manière à ce que les fibres du bois soient perpendiculaires à la planche, afin de garantir une bonne lecture de ces dernières. Chaque échantillon comporte son propre numéro d'identification.

Le ponçage



Figure 16: ponçage sous ponceuse rotative sous trois tailles de grains : 120, 320, 600 (source : Labessoulhe, 2014).

Les carottes sont ensuite poncées avec une ponceuse rotative. Différents grains sont utilisés (figure 16) : (i) un premier passage (disque à grains 120) permet d'aplanir la carotte ; (ii) le deuxième passage (grains 320) et le troisième (grains 600) font ressortir les cernes. A la loupe binoculaire, on aperçoit les cellules.

Pointage des cernes sous la loupe binoculaire

Afin d'éviter des erreurs de datation par la suite, les carottes sont préalablement pointées sous une loupe binoculaire. Cette étape consiste à faire une marque tous les dix cernes en partant de l'écorce jusqu'au cœur. Sachant que les prélèvements sur le terrain ont été effectués avant la période végétative de 2014, le premier cerne correspond à l'année 2013. Les années centennales sont marquées de trois points (2000, 1900,...). Un demi-siècle est identifié par deux points. Les années caractéristiques, où le cerne est anormalement petit ou grand sont repérées. Elles servent de point de repère dans l'attribution d'une année calendaire pour chaque cerne.

2. Numérisation des données brutes et standardisation

Les données ont été traitées par imagerie numérique. Dans un premier temps, les planches contenant les carottes pointées ont été numérisées à l'aide d'un scanner à haute résolution (Epson Expression 10000 XL) avec une résolution de 600 DPI.

1.4 : Interdatation des échantillons



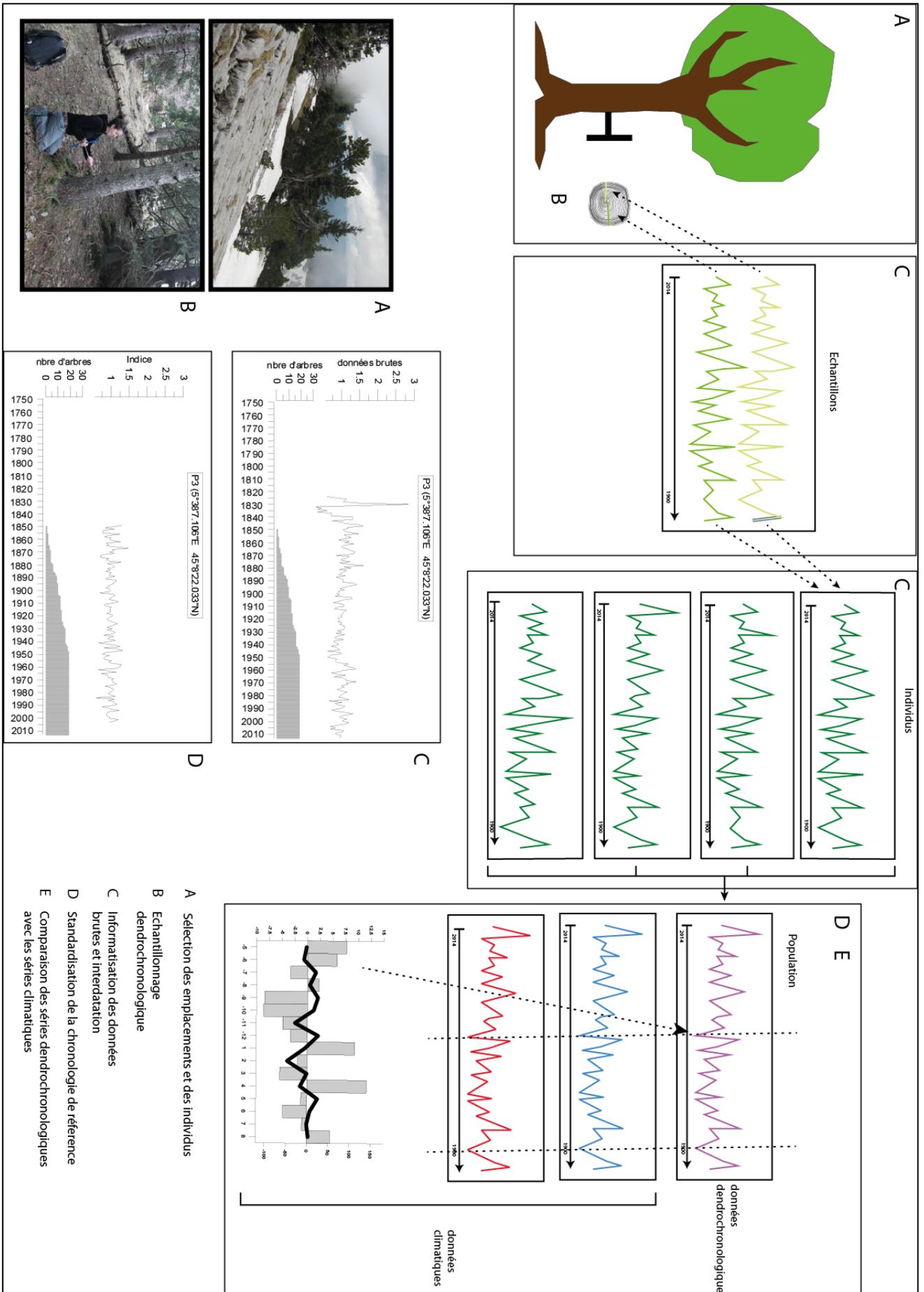
Figure 17: Comptage des cernes sous Coorecorder (source : labessoulhe, 2014)

Les cernes sont comptés et datés grâce au logiciel Coorecorder avec une précision de 0.001 mm (figure 17). Par la suite, une interdatation (ou *cross-dating*) a lieu entre les deux échantillons d'un même individu. Cette étape consiste à « vérifier et corriger la datation des cernes par comparaison des carottes entre elles » (Petitcolas, 1998). Elle permet :

- d'éviter des erreurs de datation liés à des oublis (un cerne peut être omis ou compté deux fois) ou à des anomalies anatomiques (faux cerne, cerne manquant) parfois présentes d'un seul côté de l'arbre.
- d'éviter des perturbations anatomiques liées à la pente ou des événements ponctuels: un choc d'un côté de l'arbre, non visible sur le tronc, peut modifier la croissance radiale sur une partie du tronc uniquement.
- d'augmenter la chance d'atteindre le cœur de l'arbre et donc d'obtenir une carotte la plus fidèle possible de l'âge de l'arbre.

On considère que l'interdatation est bonne lorsque le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7. Des modifications dans le comptage des cernes sont possibles afin d'améliorer cette corrélation. Si elle reste inférieure à cette valeur, l'individu est alors écarté de l'analyse.

On obtient une série moyenne pour un individu, qui correspond à la moyenne des deux carottes prélevées sur l'arbre. Les séries moyennes prélevées sur un même site sont corrélées entre elles afin de créer une collection de la population. Les individus mal corrélés sont écartés. Cette dernière étape permet de disposer pour chaque placette de données brutes, représentatives des variations de croissance du peuplement (figure 18).



1.5 : Standardisation des données brutes

Les données dendrochronologiques brutes sont la résultante d'une multitude de facteurs environnementaux et biologiques influençant la croissance du peuplement. Ces derniers se caractérisent par des signaux qui se distinguent dans leur durée :

- le signal « basse fréquence » correspond aux tendances de croissance multidécennales dues principalement à l'âge et à la dérive climatique,
- le signal « moyenne fréquence » est relatif à des tendances de croissance multiannuelles (5 à 30 ans). Elles sont d'origine climatique (crise de croissance due à des stress intenses ou répétés), sylvicole (ouverture/fermeture du milieu) ou liées à des dépérissements,
- le signal « haute fréquence » concerne les variations interannuelles, dont l'origine est principalement climatique mais aussi liée à des phénomènes ponctuels (parasites, feux,...).

La standardisation permet d'uniformiser des séries individuelles de croissance et d'éliminer des signaux indésirables (figure 19) (Mérian, 2012). Les données issues de la standardisation sont sous forme d'indice, ce qui permet la comparaison d'échantillons différents. Les signaux « basse fréquence » et « moyenne fréquence » sont écartés grâce à une double standardisation (Exponentiel négatif et spline) sous le logiciel R. La standardisation a été réalisée grâce à la routine DENDRO (gratuite et téléchargeable sur : <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/> ; Mérian, 2012)

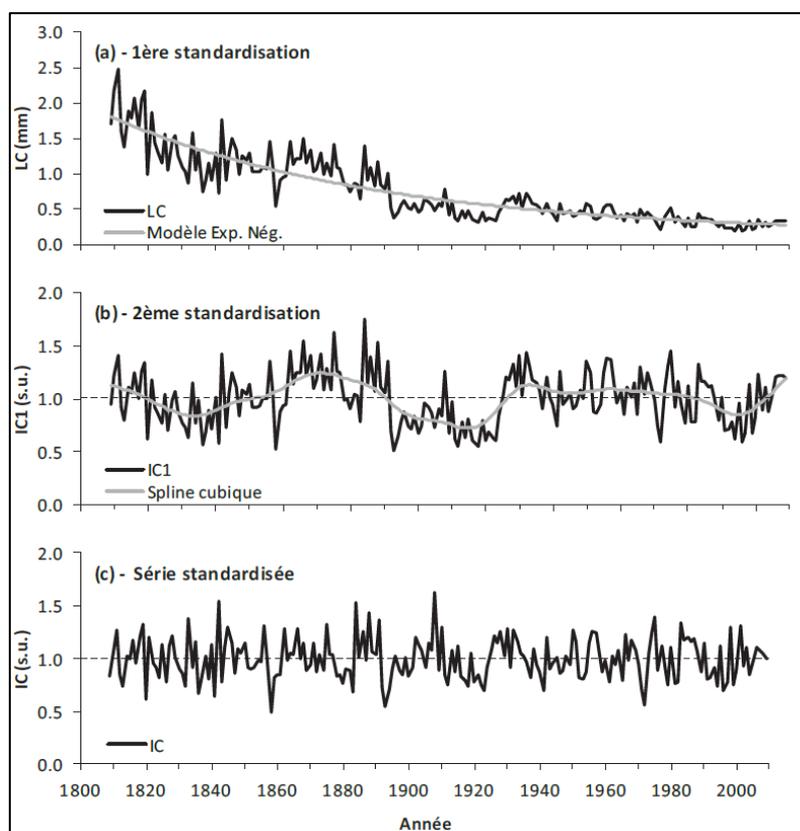


Figure 19: Double standardisation : les signaux « basse fréquence » et « moyenne fréquence » sont écartés (d'après Mérian, 2012).

La standardisation de type *exponentiel négatif* permet de mieux prendre en compte les effets de l'âge et est très utilisée car elle « convient bien aux arbres croissant en milieu ouvert et peu sujets à la compétition et aux fortes contraintes stationnelles » (Payette, 2010). La standardisation de type *spline* permet quant à elle de retirer le signal « moyenne fréquence » (Mérian, 2012). Une double pondération permet de corriger la diminution d'effectifs pour les dates les plus anciennes. On obtient alors une chronologie moyenne du peuplement, dont les valeurs sont épurées au maximum des interférences entre le climat et la croissance des arbres.

3. Acquisition des données climatiques

Le projet CERNES se concentre sur l'étude des relations entre la pinède à crochets et le climat à l'échelle mensuelle, à travers les températures et les précipitations, variables climatiques les plus couramment utilisées en dendroécologie car ce sont elles qui conditionnent en majeure partie cette relation (Payette, 2010).

Une étude des variabilités spatiotemporelles de la relation cerne-climat demande des séries climatiques longues et précises. Plusieurs stations Météo-France sont localisées sur le massif mais ces dernières sont limitées par la durée de leurs mesures ou le déplacement de la station (Bigot *et al.*, 2010). Le choix s'est donc porté sur les données homogénéisées mensuelles de la base Histalp qui remontent jusqu'en 1800 pour les précipitations et 1760 pour les températures (Auer *et al.*, 2007). Ces données ont été créées à partir de stations météorologiques où les mesures réalisées sont longues et complètes. Ces mesures ont été extrapolées sur l'ensemble du sillon alpin en prenant en compte les variations latitudinales, longitudinales et altitudinales. La comparaison entre ces données homogénéisées et les stations présentes à proximité ont permis la validation du modèle.

Au total, 557 séries représentées par des points de grille sont disponibles à l'échelle des Alpes. Ces points de grille sont séparés d'un degré en latitude et d'un degré en longitude. 35 points de grilles environ couvrent le massif du Vercors. Les points de grilles situés à proximité des placettes réalisées ont été utilisés (figure 20).

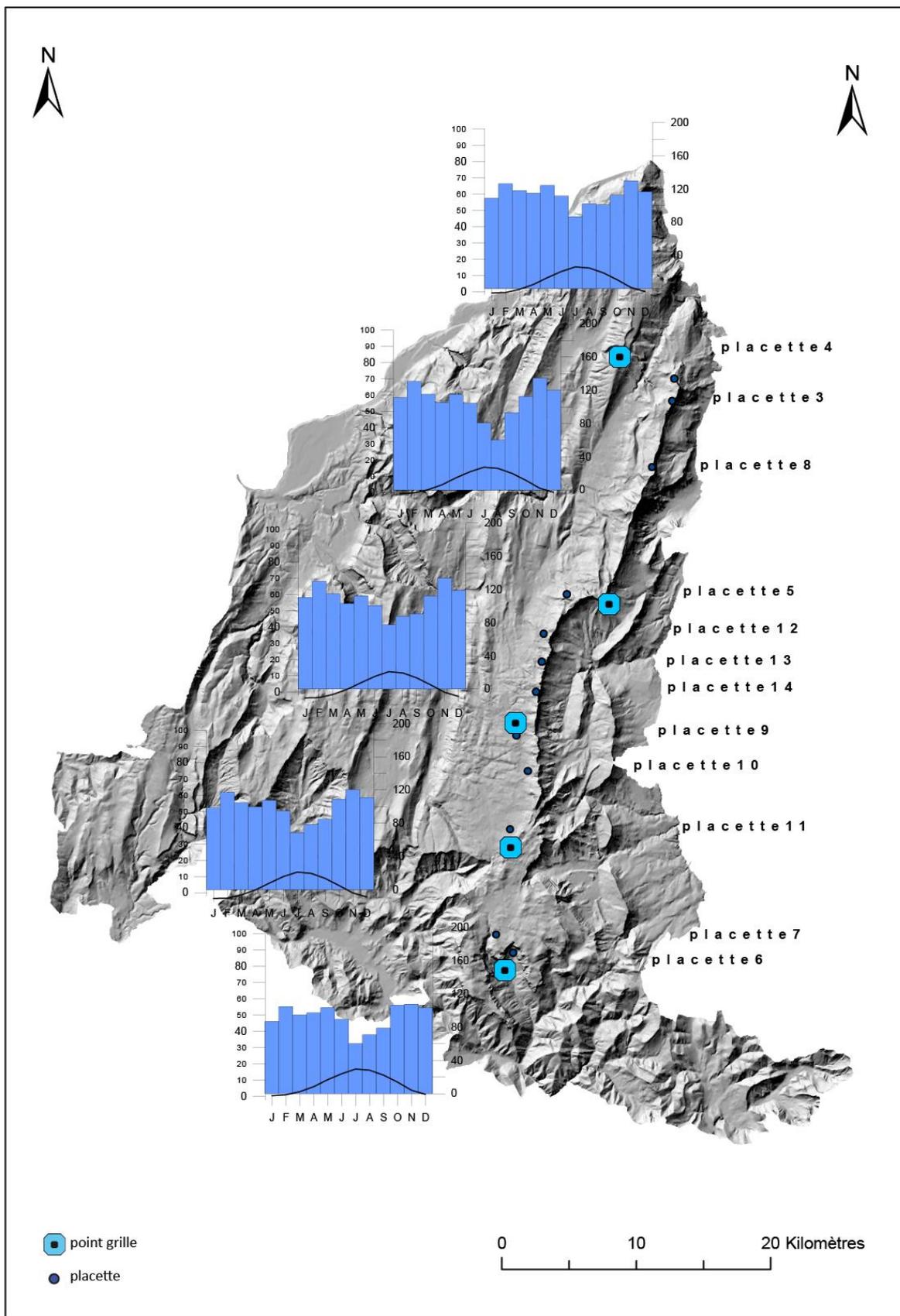


Figure 20 : Diagrammes ombrothermiques des 5 points de grille de la base de données Histalp utilisés en approche dendroécologique.

4. Etude de la relation cerne-climat

L'étude de la relation cerne-climat peut se faire à plusieurs échelles dans le temps et dans l'espace. Les méthodes développées ici ont pour objectif de comprendre ces relations sur l'ensemble de ses échelles. Les analyses statistiques permettent d'élaborer différentes corrélations pour chaque variable aux échelles interannuelles et infra annuelles. Ces corrélations sont ensuite étudiées dans le but de comprendre comment, où et pourquoi la relation cerne-climat est différente dans le temps et dans l'espace.

4.1 : Fonctions de réponse simple

La fonction de réponse est « une méthode descriptive qui permet de déterminer quels paramètres climatiques influencent au premier chef la croissance radiale et quelle est la nature et la force de la relation » (Payette, 2010). Bien que la croissance radiale soit influencée par un grand nombre de facteurs environnementaux, les fonctions de réponse permettent de faire ressortir le facteur le plus limitant. Cette méthode donne des résultats fiables si les conditions climatiques et stationnelles sont contraignantes, auquel cas les fonctions de réponse seront significatives (Mérian, 2012).

Les données météorologiques sont les régresseurs et les données dendrochronologiques les variables dépendantes (Mérian, 2012). L'étude menée ici utilise une fonction de corrélation afin de mettre en avant l'influence de chaque variable climatique dans la croissance radiale du pin à crochets. Cette relation est analysée à partir de l'année 1900 en vue de la faiblesse des données dendrochronologiques avant cette date.

Sachant que les caractéristiques anatomiques d'un cerne de l'année n peuvent être conditionnées par le climat de l'année $n-1$ (Mérian, 2012), l'étude des fonctions de réponse a été réalisée sur une fenêtre allant du mois de mai $n-1$ au mois d'août de l'année n . Cette fenêtre permet de prendre en compte la période végétative de l'année $n-1$. Il a de plus été démontré que la croissance radiale du pin à crochets est fortement influencée par les températures et les précipitations de l'été précédent (Petitcolas, 1998).

La technique *Bootstrap* a été utilisée, afin de valider les résultats obtenus. Un échantillon d'années originaire du jeu initial des données est tiré au sort et est utilisé comme étalonnage des mesures de la croissance radiale estimées seulement à partir des paramètres climatiques (Payette, 2010). Le processus est réitéré 30 fois afin d'augmenter la fiabilité des résultats.

4.2 : Etude des années caractéristiques

L'étude des années caractéristiques ou *Pointer Years* consiste à faire ressortir les cernes comportant une largeur exceptionnellement faible ou grande. Lorsque une année caractéristique ressort sur une chronologie, c'est-à-dire sur l'ensemble d'un peuplement, elle témoigne de conditions environnementales particulières généralement d'ordre climatique (Petitcolas, 1998). Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'une année caractéristique ressort sur plusieurs placettes, éloignant de l'interprétation les facteurs plus locaux.

Seules les années caractéristiques où le cerne moyen de la chronologie est anormalement petit sont étudiés. Les années de forte croissance sont en effet beaucoup plus difficiles à interpréter (Corona, 2014).

Pour cette étude, une année n est considérée comme caractéristique lorsqu'au minimum 60% des arbres de la placette présentent un cerne à l'année n 25% (ou plus) plus petit que le cerne de l'année $n-1$.

Les années identifiées comme exceptionnelles dans la croissance radiale sont alors répertoriées et les variables climatiques analysées pour l'année n et $n-1$, afin de déterminer les causes de cette croissance exceptionnellement faible.

Cette technique présente cependant un biais important, puisque l'identification d'une année caractéristique se fait par rapport au cerne de l'année précédente, dont la largeur influence fortement les résultats. Si le cerne de l'année $n-1$ est déjà anormalement petit (et peut-être déjà identifié comme le cerne d'une année caractéristique), le cerne de l'année n lui aussi petit peut ne pas être identifié comme un cerne d'une année caractéristique. A l'inverse, un cerne de taille normale peut être reconnu comme le cerne d'une année caractéristique si le cerne de l'année $n-1$ est large.

4.3 : Fonctions de réponse mobiles

Les fonctions de réponse mobiles ou *moving correlation functions* permettent d'étudier les variations temporelles de la relation cerne-climat. En lien avec la dérive climatique, il se peut que le facteur le plus limitant change de nature et qu'il soit remplacé par un autre (Mérian, 2012). L'analyse de la relation cerne-climat dépend donc fortement de la période considérée.

Cette méthode est identique à la méthode des fonctions de réponse simples au détail près qu'elle étudie cette relation sur des périodes de temps successives. Nous avons choisi d'observer les variations temporelles de la relation cerne-climat sur des fenêtres de 49 ans. Un coefficient de corrélation pour les 2 variables est calculé pour chaque intervalle : 1900-1949, 1901-1950, ..., 1951-2000.

Le choix de l'intervalle dépend de la relation que l'on veut étudier ; un intervalle court (25 ans) fera mieux ressortir les variations de relation sur des périodes courtes, mais donnera beaucoup plus de poids dans l'analyse à chaque année considérée. A l'inverse, un intervalle plus long (50 ans) mettra en avant les variations climatiques sur le long terme mais risque de passer à côté de fluctuations plus courtes, notamment le réchauffement des années 1980 (Mérian, 2012).

Chapitre III : Résultats

1. Présentation des placettes réalisées

		nbre d'arbres échantillonnés	nbre d'arbres retenus dans l'analyse	Age moyen du peuplement échantillonné
placette 4	5°38'7,034"E 45°9'14,95"N	30	22	136
placette3	5°38'7,939"E 45°8'22,704"N	30	19	114
placette 8	5°37'0,216"E 45°5'39,643"N	32	22	90
placette 5	5°32'35,599"E 45°0'18,113"N	22	17	101
placette 12	5°31'20,876"E 44°58'40,709"N	30	26	123
placette 13	5°31'20,124"E 44°57'33,542"N	30	24	158
placette 14	5°31'3,703"E 44°56'20,167"N	27	23	106
placette 9	5°30'6,660"E 44°54'31,008"N	30	18	144
placette 10	5°30'48,391"E 44°53'5,008"N	25	22	130
placette 11	5°29'56,821"E 44°50'42,872"N	30	30	126
placette 7	5°29'25,746"E 44°46'28,74"N	30	27	105
placette6	5°30'22,895"E 44°45'45,507"N	24	11	97
total		340	261	/
moyenne		28,33	21,75	119,17

Dans le cadre du projet CERNES, 340 arbres ont été échantillonnés sur le massif du Vercors et 261 ont servi dans l'analyse dendroécologique. En moyenne, 28 arbres ont été carottés par placette. L'âge moyen du peuplement échantillonné varie de 90 ans pour la placette 8 à près de 160 ans pour la placette 13.

		altitude moyenne (mètres)	exposi tion	type de sol	pente moyenne %	caractéristique du peuplement	concurrence inter espèces
placette4	5°38'7,034"E 45°9'14,95"N	1750	W	sol fin / lapiaz	15%	îlots	oui
placette3	5°38'7,939"E 45°8'22,704"N	1650	W	sol fin / lapiaz	15%	îlots	oui
placette8	5°37'0,216"E 45°5'39,643"N	1800	W	sol fin/lapiaz	20%	îlots	oui
placette5	5°32'35,599"E 45°0'18,113"N	1800	W	sol fin	15%	îlots	oui
placette12	5°31'20,876"E 44°58'40,709"N	1750	W	sol fin	25%	îlots	non
placette13	5°31'20,124"E 44°57'33,542"N	1830	NW	sol fin	15%	îlots	non
placette14	5°31'3,703"E 44°56'20,167"N	1900	W	sol fin/lapiaz	25%	îlots	non
placette9	5°30'6,660"E 44°54'31,008"N	1630	NW	sol fin	15%	peuplement homogène	non
placette10	5°30'48,391"E 44°53'5,008"N	1690	W	sol	5%	peuplement homogène	oui
placette11	5°29'56,821"E 44°50'42,872"N	1660	N	sol	10%	îlots	oui
placette7	5°29'25,746"E 44°46'28,74"N	1630	S	sol	15%	îlots	oui
placette6	5°30'22,895"E 44°45'45,507"N	1200	SW	éboulis	15%	îlots	oui

Figure 21 : Principales caractéristiques des placettes : coordonnées géographiques, altitude, exposition, caractéristiques topographiques et édaphiques, type de peuplement.

Les 12 placettes sont situées sur un axe latitudinale de Saint-Nizier-du-Moucherotte au cirque d'Archiane. Les altitudes de ces dernières varient entre 1200 mètres pour la placette la plus au sud et 1900 mètres pour la placette 14 (figure 21). La structure de la pinède est généralement sous forme d'îlots forestiers positionnés sur de la roche nue ou du sol très fin (figure 22). La pente moyenne est d'environ 15% et l'exposition principalement ouest.

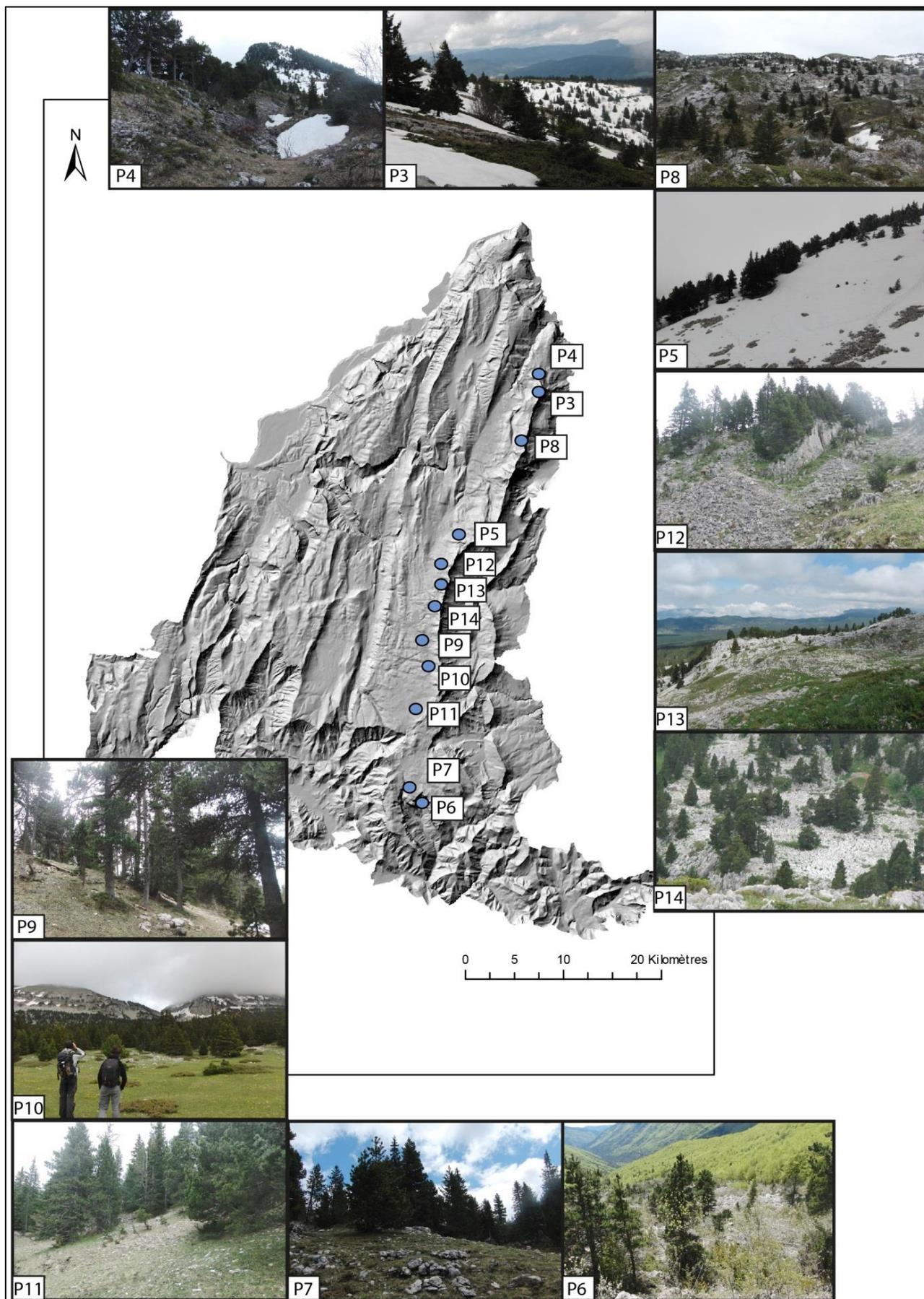


Figure 22 : Localisation géographique et faciès paysager des 12 placettes échantillonnées (source : Labessoulhe, 2014).

La placette 6 est celle qui se différencie le plus des autres par son altitude et sa latitude. On observe des similitudes dans le faciès des placettes 3, 4 et 8 avec la présence d'îlots regroupés et une pente similaire. Malgré l'altitude, des épicéas sont présents à proximité des pins à crochets pour une grande majorité des placettes. Les pentes sont plus fortes en haut des Hauts-Plateaux, sauf pour la 10 et 11 qui se trouvent plus bas sur le versant ouest. Le peuplement y est d'ailleurs homogène avec des arbres plus élancés et un sol plus profond. Il en est de même pour la placette 7, qui est en revanche localisée bien plus au sud, aux portes du massif.

La placette 5 est située sous Le Moucherolle, à proximité de la station de Villard-de-Lans. L'étude réalisée en 1995 (Rolland *et al.*) sur *Pinus uncinata* a été réalisée à proximité de cette placette. Plus éloignée du haut de crête, elle comporte pour le reste des conditions locales similaires. Les placettes 12, 13, 14, 9, 10 et 11 sont toutes situées au cœur du massif, sur la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux.

Les résultats exposés indiquent des dissimilitudes entre les placettes au niveau des variations interannuelles de croissance. Elles restent cependant faibles en vue des coefficients de corrélation inter peuplements (figure 23).

	moyenne	placette 4	placette 3	placette 8	placette 5	placette 12	placette 13	placette 14	placette 9	placette 10	placette 11	placette 7	placette 6
moyenne		0,63	0,77	0,72	0,59	0,81	0,74	0,52	0,69	0,75	0,63	0,72	0,22
placette 4	0,63		0,68	0,64	0,51	0,68	0,62	0,61	0,47	0,72	0,42	0,75	0,19
placette 3	0,77	0,68		0,78	0,64	0,68	0,7	0,61	0,67	0,64	0,74	0,55	0,31
placette 8	0,72	0,64	0,78		0,68	0,74	0,72	0,68	0,58	0,53	0,68	0,57	0,11
placette 5	0,59	0,51	0,64	0,68		0,49	0,67	0,41	0,49	0,64	0,55	0,56	0,1
placette 12	0,81	0,68	0,68	0,74	0,49		0,78	0,76	0,76	0,68	0,73	0,59	0,26
placette 13	0,74	0,62	0,7	0,72	0,67	0,78		0,61	0,63	0,69	0,6	0,66	0,14
placette 14	0,52	0,61	0,61	0,68	0,41	0,76	0,61		0,56	0,61	0,42	0,65	0,09
placette 9	0,69	0,47	0,67	0,58	0,49	0,76	0,63	0,56		0,69	0,64	0,61	0,27
placette 10	0,75	0,72	0,64	0,53	0,64	0,68	0,69	0,61	0,69		0,74	0,67	0,26
placette 11	0,63	0,42	0,74	0,68	0,55	0,73	0,6	0,42	0,64	0,74		0,67	0,27
placette 7	0,72	0,75	0,55	0,57	0,56	0,59	0,66	0,65	0,61	0,67	0,67		0,34
placette 6	0,22	0,19	0,31	0,11	0,1	0,26	0,14	0,09	0,27	0,26	0,27	0,34	

Figure 23 : Coefficients de corrélation inter-populations et corrélation moyenne.

Le coefficient de variation moyen est de 0,58. Les placettes 6 et 14 sont celles qui se corrént le moins bien (0,09). Les séries dendrochronologiques qui se ressemblent le plus sont celles des placettes 8 et 13 (0,78) et 12 et 3 (0,78).

2. Standardisation des chronologies

La figure 24 présente les chronologies standardisées des 12 peuplements échantillonnés. Les séries dendrochronologiques sont sous forme d'indice et le nombre d'individu présent dans la chronologie est représenté en gris. On considère que le signal est représentatif du peuplement à partir de 3 individus. Au-dessous de ce seuil, les fluctuations de croissance sont considérées comme trop dépendantes des caractéristiques physiques et biologiques individuelles de l'individu et de son environnement. D'une manière générale les séries sont interprétables à partir de 1880. La série interprétable la plus longue et celle de la placette 13 qui commence en 1775.

Il est globalement difficile d'identifier des périodes de fortes ou de faibles croissances des peuplements. On observe tout de même une période de croissance importante pour l'ensemble des placettes entre 1950 et 1960 (figure 24).

Certains cernes se distinguent par un indice fort ou faible dont l'occurrence est plus élevée à partir des années 1960. Pour certaines années, on retrouve pour l'ensemble des placettes la présence d'un cerne caractéristique ; ainsi 1962, 1984 et 2004 ressortent comme des années où le cerne correspondant est particulièrement étroit. 1816, 1824 et 1838 ressortent aussi, mais seulement pour la placette 13 où la série est suffisamment longue.

Les variations interannuelles de la croissance radiale des chronologies sont plus importantes au sud qu'au nord du massif du Vercors. Les coefficients de variation indiquent que la croissance des placettes 4,3 et 8 est plus stable que celle des placettes 11, 7 et 6. Les placettes 14 et 10 possèdent le coefficient de variation le plus faible.

P4	P3	P8	P5	P12	P13	P14	P9	P10	P11	P7	P6
0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,13	0,17	0,13	0,18	0,19	0,21

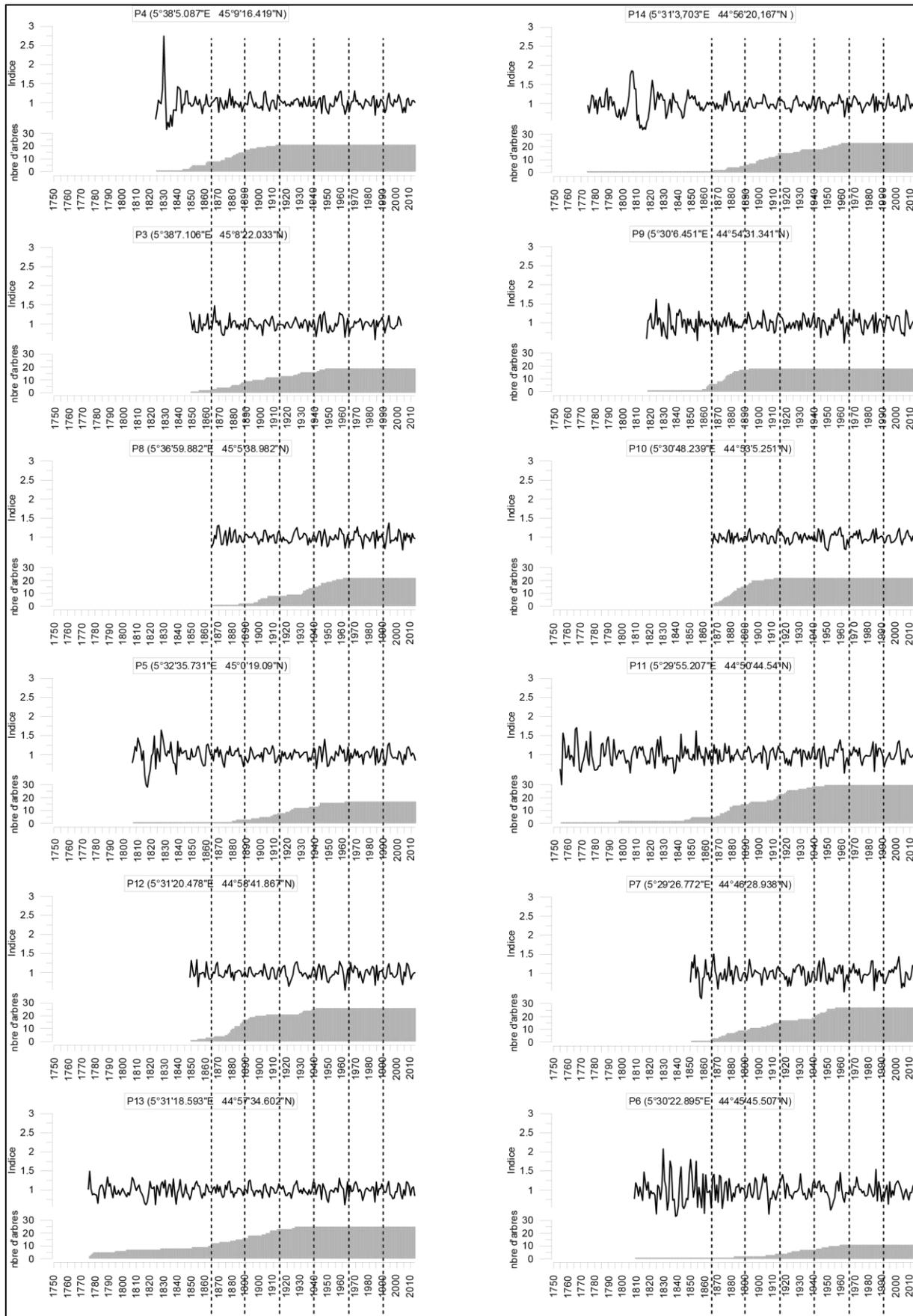


Figure 24 : Représentation des 12 séries dendrochronologiques standardisées (indice) ainsi que le nombre d'individu présent dans la série.

3. Fonctions de réponse simple

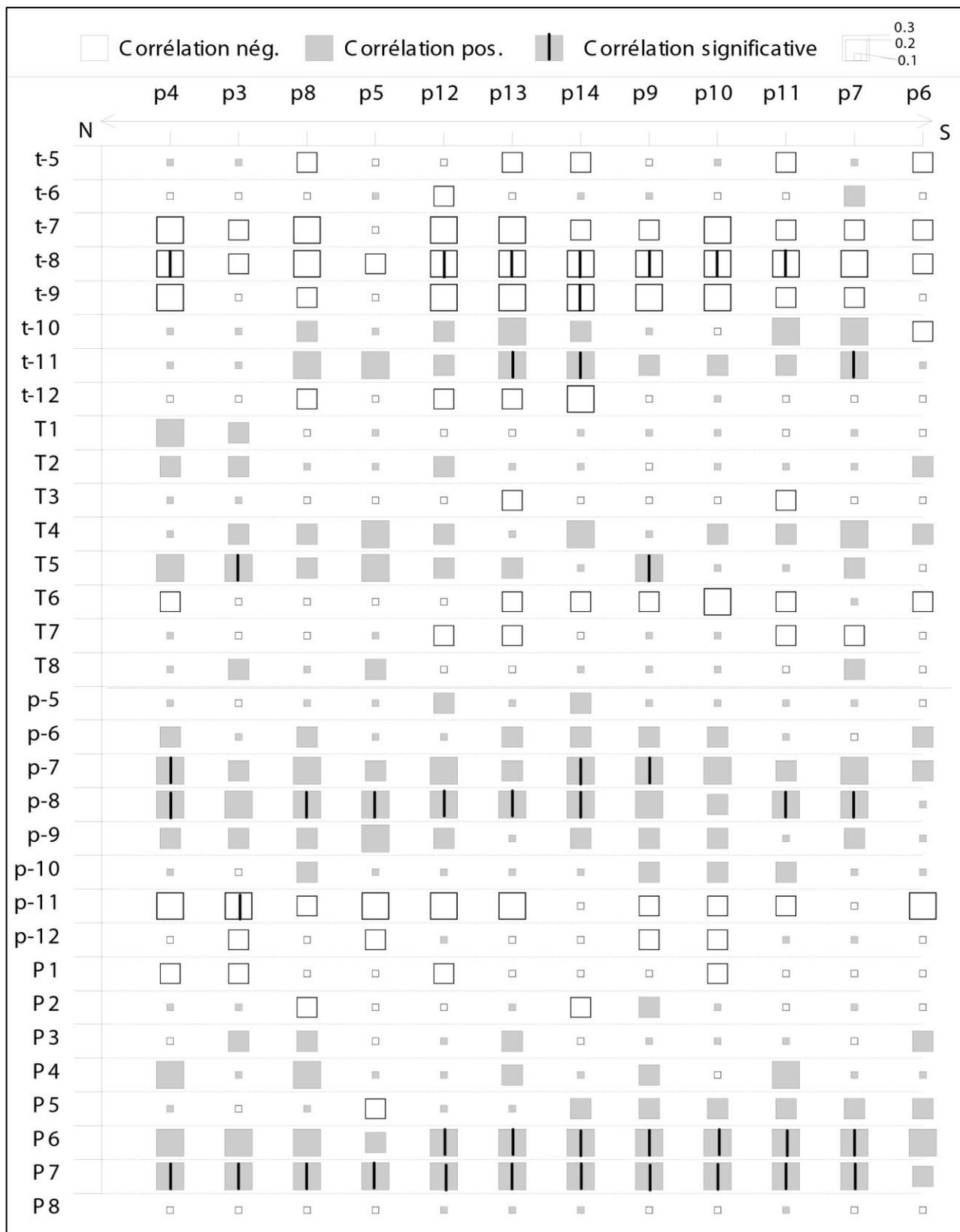


Figure 25 : Représentation des coefficients de corrélation entre les 12 séries dendrochronologiques et les variables climatiques (températures et précipitations) pour le mois de mai $n-1$ jusqu'au mois d'août de l'année n (données climatiques issues d'Histalp, 2007) à l'échelle du XIXème siècle.

La figure 25 présente l'intensité de la relation entre la croissance des arbres de chaque placette et les deux variables climatiques utilisées dans l'analyse. Cette relation est étudiée à l'échelle mensuelle du mois de mai $n-1$ au mois d'août de l'année n . Deux types de corrélation existent, les corrélations négatives et les corrélations positives. Un trait vertical est présent lorsque la corrélation est significative.

3.1 : Températures

Une majorité des placettes sont corrélées négativement avec les températures d'août de l'année $n-1$. Les mois de juillet $n-1$, septembre $n-1$ et juin de l'année n ressortent aussi, mais de manière moins significative. Octobre et novembre de l'année $n-1$ ainsi que avril et mai de l'année n sont corrélés positivement aux données dendrochronologiques. Il est intéressant de noter que la placette 3 ne se corrèle jamais aux températures de manière significative, à l'exception du mois de mai de l'année n .

Une variabilité spatiale est visible dans la relation cerne-climat (figure26) :

- Les placettes situées au centre de la réserve se corréleront mieux avec les températures de septembre $n-1$, que les autres placettes,
- Les températures d'octobre $n-1$ se corréleront mieux avec les placettes au sud de la réserve,
- A l'inverse, les températures du mois de mai de l'année n sont corrélées aux placettes les plus au nord.

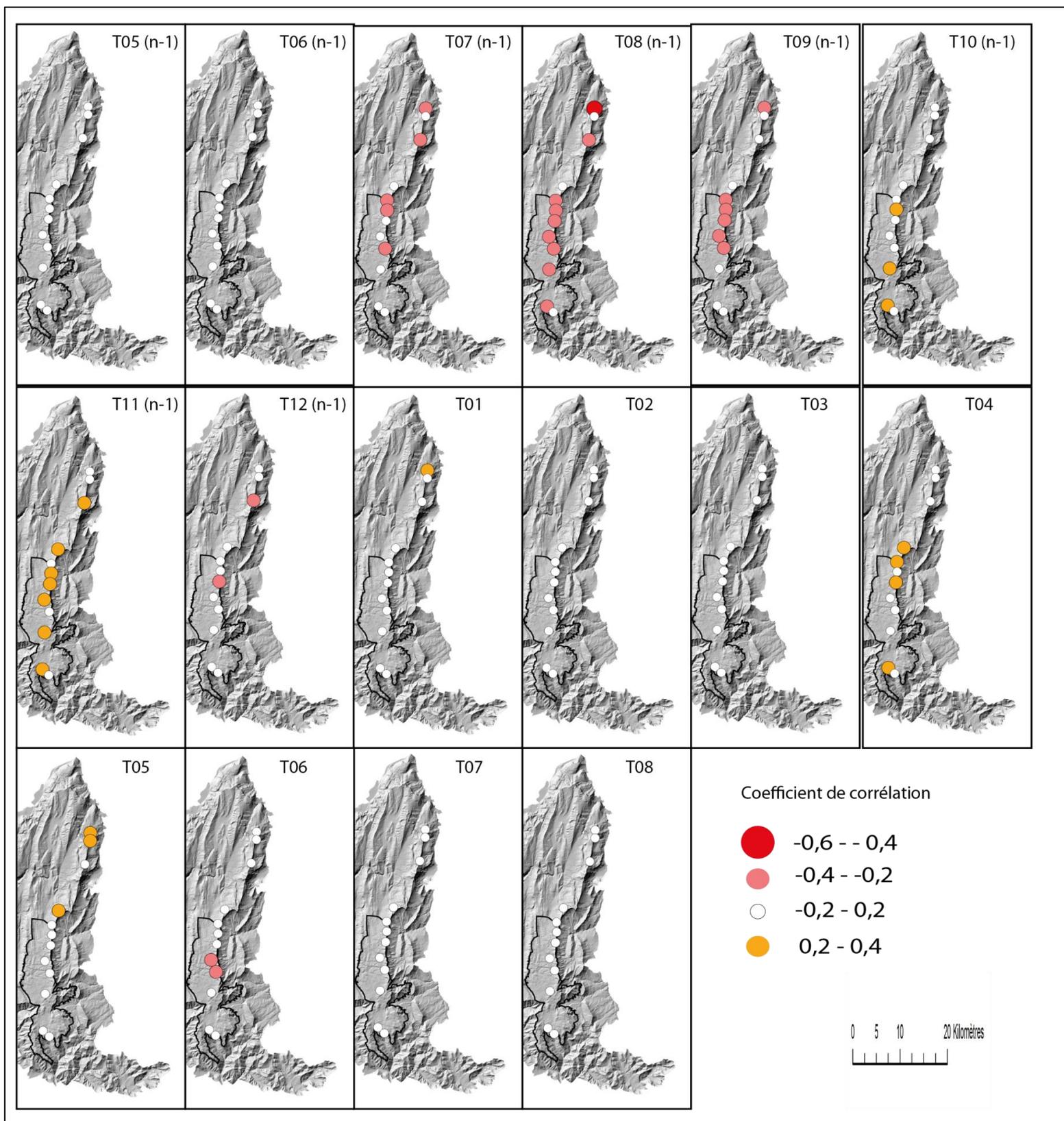


Figure 26 : Représentation spatiale de l'intensité de la relation cerne-climat entre les 12 séries dendrochronologiques et les températures moyennes mensuelles entre le mois de mai $n-1$ et le mois d'août de l'année n (données climatiques issues de la base HistaIp, 2007) à l'échelle du XIXème siècle.

3.2 : Précipitations

La variable précipitation est plus fortement corrélée aux données dendrochronologiques que la variable température. Des corrélations positives et significatives sont observables durant l'été de l'année n et $n-1$. La croissance radiale de la pinède à crochets du massif du Vercors répond de manière positive aux précipitations du mois de juillet $n-1$, août $n-1$, et du mois de juin et de juillet de l'année n . Dans une moindre mesure, les précipitations de septembre $n-1$, d'avril et de mai de l'année n ont une influence positive sur la croissance des arbres.

Au niveau des corrélations négatives, seul le mois de novembre $n-1$ ressort véritablement.

Comme pour les températures, un axe latitudinal est visible dans les réactions de la pinède à crochets face aux précipitations mensuelles (figure 27):

- Les placettes au sud sont mieux corrélées aux précipitations de novembre,
- Il en est de même pour les précipitations du mois de juin de l'année n .

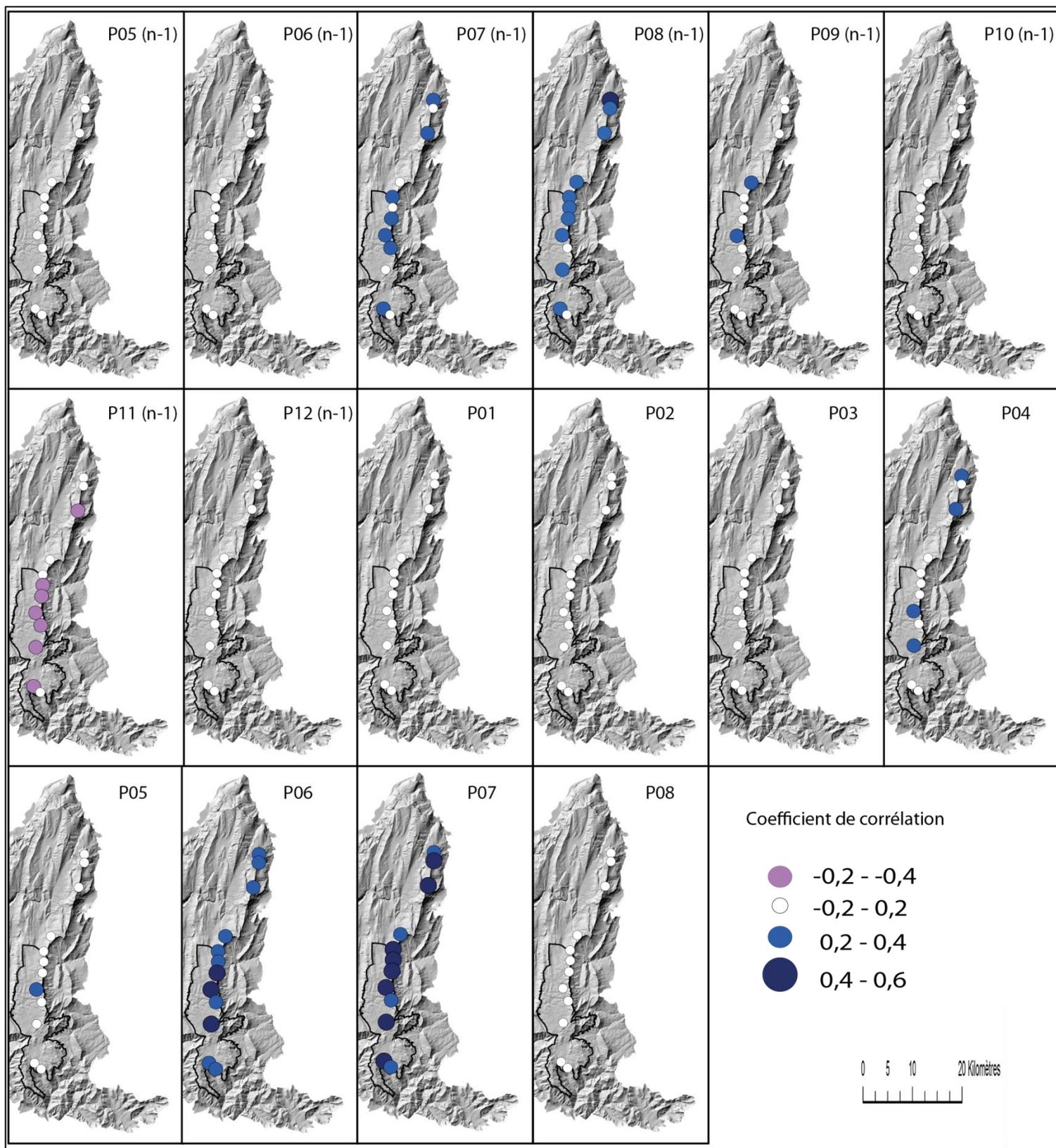


Figure 27 : Représentation spatiale de l'intensité de la relation cerne-climat entre les 12 séries dendrochronologiques et les précipitations moyennes mensuelles entre le mois de mai $n-1$ et le mois d'août de l'année n (données climatiques issues de la base HistaIp, 2007) à l'échelle du XIXème siècle.

4. Etude des années caractéristiques

Les années caractéristiques ou *Pointer Years* représentent les années où la croissance radiale du peuplement étudié est particulièrement faible ou forte. Notre étude se concentre sur l'étude des cernes minces (voir chapitre II 4.2). Un cerne d'une chronologie est considéré comme caractéristique lorsqu'au minimum 60% des individus présents comportent un cerne inférieur par sa taille de plus de 25% par rapport au cerne précédent.

1984 est l'année la plus caractéristique enregistrée à l'échelle du massif (figure 28). 10 placettes sur 12 présentent un cerne caractéristique pour plus de 80% des individus. 1945, 1962 et 1965 sont des années qui ressortent aussi fortement.

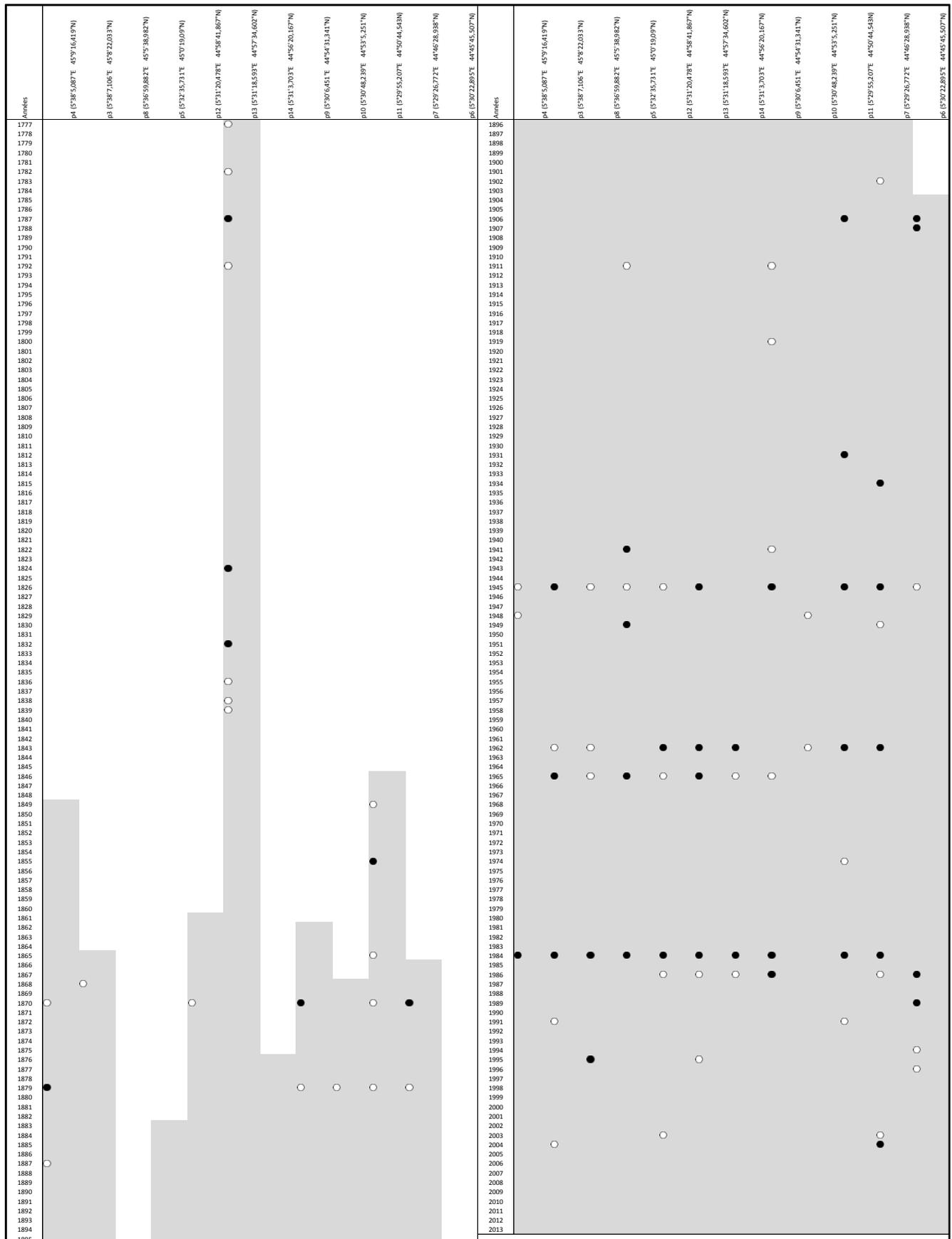


Figure 28 : Années aux croissances négatives caractéristiques observées sur la pinède à crochets du massif du Vercors d'après le calcul des pointer years (d'après P. Mérian, 2012). Les années où 60% à 80% des individus de la chronologie présentent une largeur de cerne 25% ou plus inférieure au cerne précédent sont représentées par un cercle blanc. Le cercle noir indique que plus de 80% des individus présentent un cerne au minimum 25% plus petit que celui de l'année $n-1$.

Les seuils fixés dans le calcul des années caractéristiques sont cependant très différents selon les études. Dans sa thèse (2012), Mérian s'inspire des seuils de Becker (1994) et de ses travaux antérieurs avec Lebourgeois (2011) en identifiant les *Pointer Years* comme des années où 75% des individus présentent un cerne inférieur au minimum de 10% au cerne de l'année $n-1$. Les seuils préalablement fixés sont susceptibles de modifier considérablement les résultats et doivent donc être choisis avec soin. Afin de vérifier si notre seuil relatif aux individus n'est pas trop discriminant, la figure 29 représente le pourcentage d'individus dont la croissance radiale du cerne des années considérées comme caractéristiques est inférieure à 25% ou plus au cerne de l'année d'avant. Les années caractéristiques identifiées pour chaque placette d'après les seuils que nous avons choisis sont indiquées en gras.

On s'aperçoit que certaines années comme 1879, 1941, 1949, 1986 ou 2003 ressortent plus fortement.

	1824	1832	1836	1838	1839	1849	1855	1865	1868	1870	1879	1887	1902	1906	1907	1911	1931	1934
placette 4						0	20	0	0	75	81,82	60	21,05	15	25	40	28,57	19,05
placette 3								33,33	66,67	50	40	37,5	50	26	16,67	41,67	43,75	18,75
placette 8													16,67	25	0	25	0	7,69
placette 5													40	0	0	71,43	16,67	0
placette 12								0	0	75	55,56	13,33	25	38,1	9,52	47,62	13,04	8,33
placette 13	85,71	87,5	75	75	62,5	12,5	22,22	0	16,67	16,67	42,86	6,67	47,37	10	25	18,18	16	8
placette 14											25	0	10	18,18	25	0	11,11	5,56
placette 9								33,33	16,67	87,5	64,29	11,76	22,22	44,44	0	72,22	50	22,22
placette 10								0	0	66,67	0	10	42,86	0	13,64	36,36	9,09	
placette 11						66,67	100	60	40	66,67	69,23	13,33	58,82	88,89	0	26,32	85,19	18,52
placette 7								33,33	100	71,43	11,11	75	38,46	23,08	26,67	44,44	94,44	
placette 6													100	100	33,33	57,14	14,29	
	1941	1945	1948	1949	1962	1965	1974	1984	1986	1989	1991	1994	1995	1996	2003	2004		
placette 4	52,38	76,19	71,43	4,76	42,86	57,14	23,81	90,48	33,33	4,76	57,14	0	33,33	19,05	23,81	47,62		
placette 3	50	83,33	36,84	42,11	78,95	84,21	5,26	100	21,05	5,26	63,16	0	47,37	5,26	31,58	63,16		
placette 8	20	66,67	16,67	42,11	77,27	63,64	18,18	86,36	45,45	4,55	50	4,55	81,82	4,55	27,27	59,09		
placette 5	84,62	62,5	50	87,5	58,82	88,24	0	94,12	52,94	0	41,18	0	41,18	11,76	23,53	17,65		
placette 12	46,15	65,38	38,46	50	88,46	61,54	26,92	88,46	69,23	7,69	11,54	0	34,62	0	73,08	34,62		
placette 13	56	92	16	40	84	88	8	84	60	0	24	0	64	12	48	20		
placette 14	55,56	44,44	10,53	31,58	91,3	69,57	17,39	82,61	60,87	0	21,74	0	56,52	8,7	52,17	13,04		
placette 9	66,67	94,44	11,11	44,44	100	61,11	44,44	88,89	94,44	5,56	33,33	16,67	0	22,22	50	22,22		
placette 10	22,73	50	72,73	4,55	77,27	27,27	36,36	54,55	40,91	4,55	27,27	4,55	0	40,91	45,45	27,27		
placette 11	58,62	100	26,67	46,67	100	50	60	100	56,67	10	66,67	6,67	6,67	16,67	53,33	56,67		
placette 7	38,1	82,61	30,43	70,83	100	33,33	55,56	100	66,67	22,22	40,74	7,41	0	11,11	74,07	85,19		
placette 6	0	62,5	44,44	22,22	18,18	27,27	18,18	18,18	90,91	81,82	27,27	72,73	0	72,73	0	36,36		

Figure 29 : Pourcentage d'individus par série caractérisés par la présence d'un cerne mince pour les années identifiées comme caractéristiques.

Afin d'identifier le lien entre ces années où la croissance radiale est faible et le climat, une description des conditions météorologiques sur l'année n et $n-1$ permet (i) d'identifier des conditions climatiques particulières pouvant être à l'origine de ces années caractéristiques, (ii) de savoir si le pin à crochets produit un cerne mince selon un profil météorologique particulier ou bien s'il est impacté négativement par différents schémas climatiques, (iii) d'observer ces années extrêmes à travers un axe latitudinal.

La figure 30 indique pour chaque année le nombre de placette(s) dont le cerne est identifié comme le témoin d'une année caractéristique. Sur 194 années, 34 possèdent au minimum une placette dont le cerne de la chronologie est mince soit environ 17 % des années depuis 1820. Plus de la moitié de ces années caractéristiques sont identifiées comme telle par la présence d'une seule placette qui possède un cerne caractéristique. Chronologiquement, l'occurrence des *Pointer Years* et leur intensité en terme de nombre de placettes mobilisées augmente à partir de 1940 et plus particulièrement au début des années 1980. Lorsque plusieurs placettes réagissent une même année en produisant un cerne mince, il est fort probable que l'origine de ce stress soit d'ordre climatique.

Les conditions climatiques de l'année n et $n-1$ (à partir du mois de mai) sont analysées pour chaque année caractéristique où plus de la moitié des placettes possèdent un cerne mince. Afin d'identifier des anomalies climatiques à l'échelle infra annuelle, les écarts à la moyenne (1961-1990) des précipitations et des températures sont utilisées.

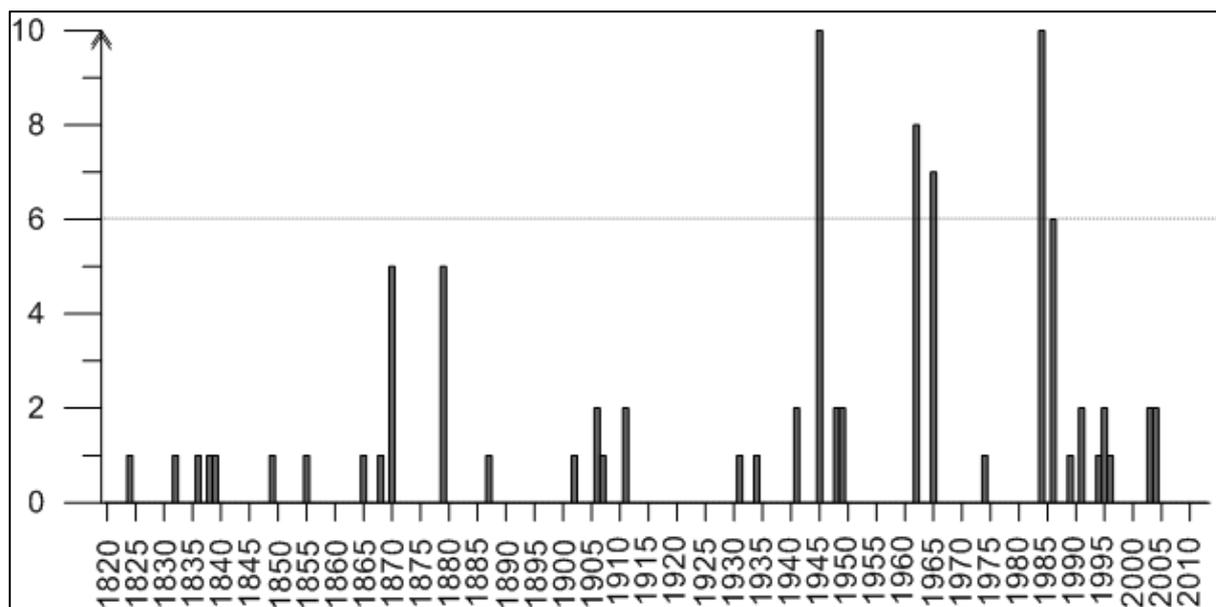


Figure 30 : Nombre de placettes identifiant une année caractéristique entre 1820 et 2013.

1945

En 1945, 10 placettes sur 12 possèdent un cerne mince. Les placettes 14 et 10 dont le cerne n'est pas identifié comme caractéristique réagissent tout de même à cette année puisque 44% et 50% des individus de ces peuplements possèdent un cerne inférieur de 25% au cerne de l'année précédente. Un stress est donc enregistré sur l'ensemble de la pinède à crochets du massif du Vercors.

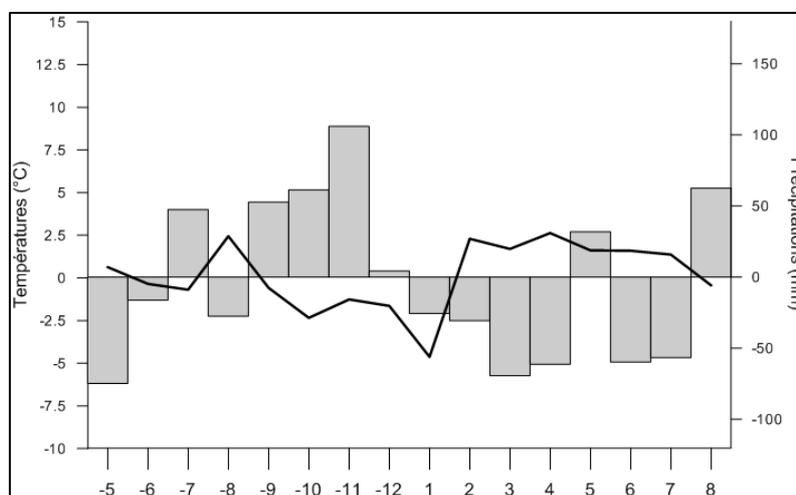


Figure 31 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1944 et 1945 (données : Histaalp, 2007).

En 1944, après un mois d'août chaud, les températures automnales et hivernales ont été particulièrement basses, jusqu'à -5°C par rapport à la moyenne en janvier 1945 (figure 31). La tendance s'inverse par la suite durant le printemps et l'été 1945, où les températures mensuelles enregistrent des écarts de plus de 2°C.

Les précipitations automnales de 1944 sont élevées. En revanche, l'année 1945 est caractérisée par une faible pluviométrie avec des écarts à la moyenne de plus de 50 mm pour les mois de mars, avril, juin et juillet.

1962

En 1962, 8 placettes possèdent un cerne caractéristique mais l'ensemble des peuplements réagissent à cette année (figure 32), à l'exception de la 6 ou seulement 18% des individus possèdent un cerne inférieur de 25% ou plus au cerne de 1961. Là encore, le stress est enregistré sur l'ensemble du massif.

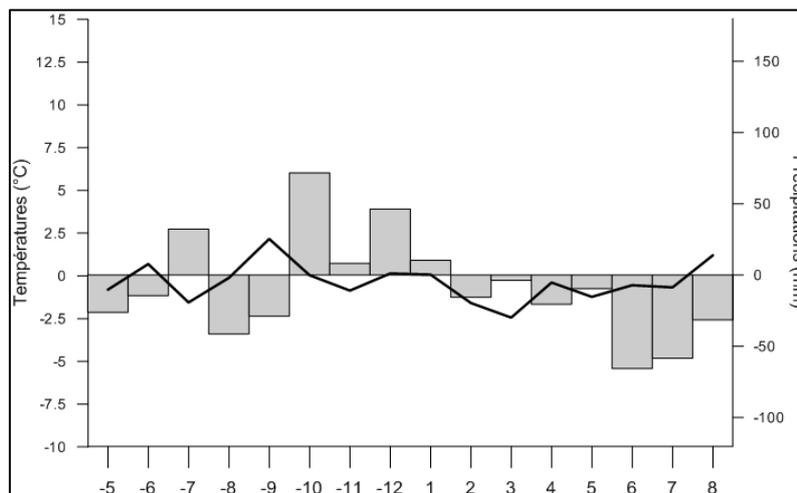


Figure 32 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1961 et 1962 (données : Hystalp, 2007).

On trouve une fin d'été particulièrement chaude en 1961 et un mois de mars 1962 plus froid que la moyenne (-2,5°C d'écart). Le reste du temps, les températures mensuelles sont relativement conformes aux valeurs enregistrées entre 1961 et 1990 (figure 32). En revanche, le printemps et l'été de 1961 et 1962 sont caractérisés par des déficits hydriques, très importants en 1962. Seuls les mois d'octobre et décembre de l'année *n-1* sont plus humides.

1965

En 1965, 7 placettes sur 12 sont identifiées comme ayant un cerne caractéristique. Un gradient latitudinal est clairement visible. Toutes les placettes comportant un cerne mince sont situées aux latitudes les plus élevées du massif. La placette 4, la plus au nord, n'enregistre pas l'année 1965 comme étant une année caractéristique. Cependant, 57% de ces individus présentent un cerne mince, soit 3 points de moins que les autres. Pour les placettes situées au sud du massif, 35% des individus en moyenne possèdent un cerne mince.

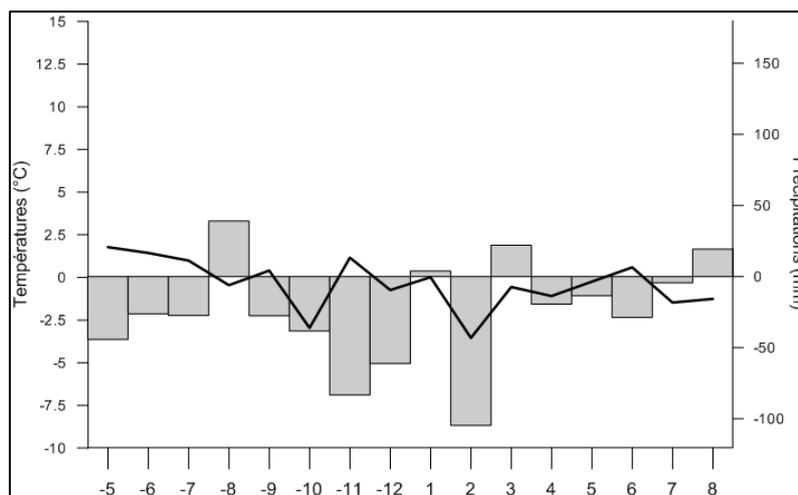


Figure 33 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1964 et 1965 (données : Hystalp, 2007).

Les températures sont majoritairement inférieures à la moyenne de la fin de l'été 1964 à la fin de l'été 1965, avec des écarts avoisinant les 3°C pour les mois d'octobre *n-1* et de février *n* (figure 33).

Les précipitations sont déficitaires, sur l'ensemble de la période (à l'exception des mois d'août et du mois de mars). L'hiver est particulièrement marqué par un déficit hydrique.

1984

En 1984, 10 placettes sur 12 possèdent un cerne mince. 54% des individus de la placette 10 ont un cerne étroit, 18% pour la placette 6. Hormis cette dernière, le signal est commun sur l'ensemble du peuplement.

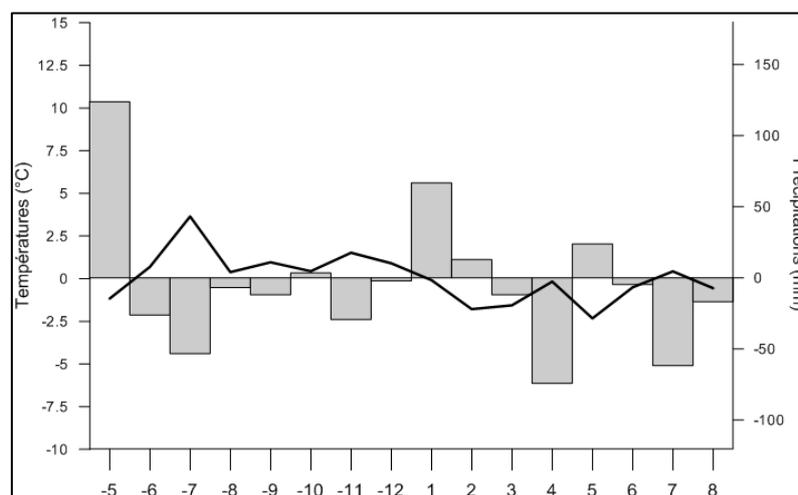


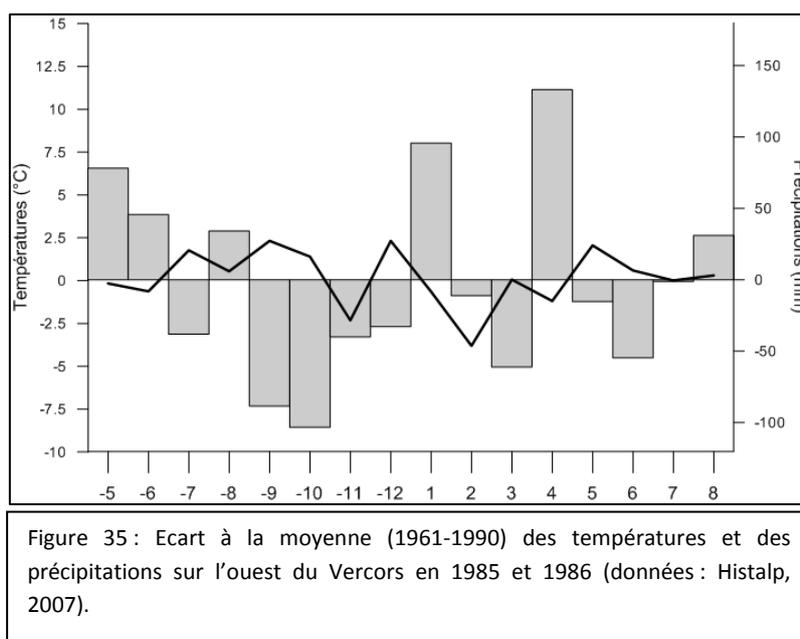
Figure 34 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1983 et 1984 (données : Hystalp, 2007).

En 1983, l'été et l'automne sont chauds, avec un écart à la moyenne positif de 4°C pour le mois de juillet (figure 34). En revanche, le début de l'année 1984 enregistre des écarts négatifs à la moyenne pour les températures jusqu'à la fin de l'été.

Après un mois de mai $n-1$ exceptionnellement pluvieux (plus de 130 mm de précipitations excédentaires), la fin de l'année 1983 et 1984 sont caractérisées par un déficit pluviométrique, mis à part janvier et mai. C'est en avril et en juillet que ce déficit est le plus important.

1986

En 1986, 6 placettes possèdent un cerne mince mais entre 21% et 57% des individus des autres peuplements enregistrent un cerne inférieur au minimum de 25% au cerne de l'année $n-1$. A l'inverse de 1965, ce sont cette fois les placettes situées dans la partie méridionale du Vercors qui sont les plus touchées.



1985 et 1986 sont marquées par une forte variabilité au niveau des températures, avec des écarts à la moyenne positifs et négatifs importants (figure 35). L'été $n-1$ est plus chaud que la moyenne. Dans l'automne, les températures diminuent. Le mois de décembre est chaud, 2,5°C de plus que la moyenne, tandis que janvier et février sont glacials (près de -4°C pour le mois de février). Les températures augmentent progressivement à l'automne pour finalement retrouver des valeurs normales durant les mois d'été.

Comme pour les températures, les précipitations sont anormalement déficitaires ou excédentaires en fonction des saisons. Les mois d'été de l'année $n-1$ sont globalement pluvieux, tandis qu'un fort manque d'eau intervient à l'automne (près de 250 mm cumulés sur la saison). Ce déficit se poursuit durant l'hiver et le printemps de l'année n excepté pour le mois de janvier et le mois d'avril fortement arrosés (jusqu'à plus de 140 mm par rapport à la moyenne en avril). Les précipitations d'août 1986 sont quant à elle légèrement excédentaires.

5. Fonctions de réponse mobiles

Les fonctions de réponses mobiles permettent d'analyser la relation cerne-climat en ajoutant une dimension temporelle à l'échelle spatiale. De la même manière que pour les fonctions de réponse simples, des coefficients de corrélation nous renseignent de l'influence des précipitations et des températures mensuelles sur la croissance radiale des peuplements au XIXème. Le siècle est divisé en plusieurs périodes afin d'observer des évolutions potentielles dans cette relation.

La figure 36 représente les coefficients de corrélation à l'échelle mensuelle des précipitations et des températures pour chaque placette. Un coefficient de corrélation est représenté en couleur dans un rectangle lorsque celui-ci est supérieur ou inférieur à 0,4 et qu'il est significatif. Les années sont représentées en ordonnée du rectangle. Les placettes sont positionnées sur un axe latitudinale afin de prendre en compte la variabilité spatiale. Des graphiques représentant ces corrélations à l'échelle des 12 peuplements sont disponibles en annexe, ainsi que leur description (annexe 4).

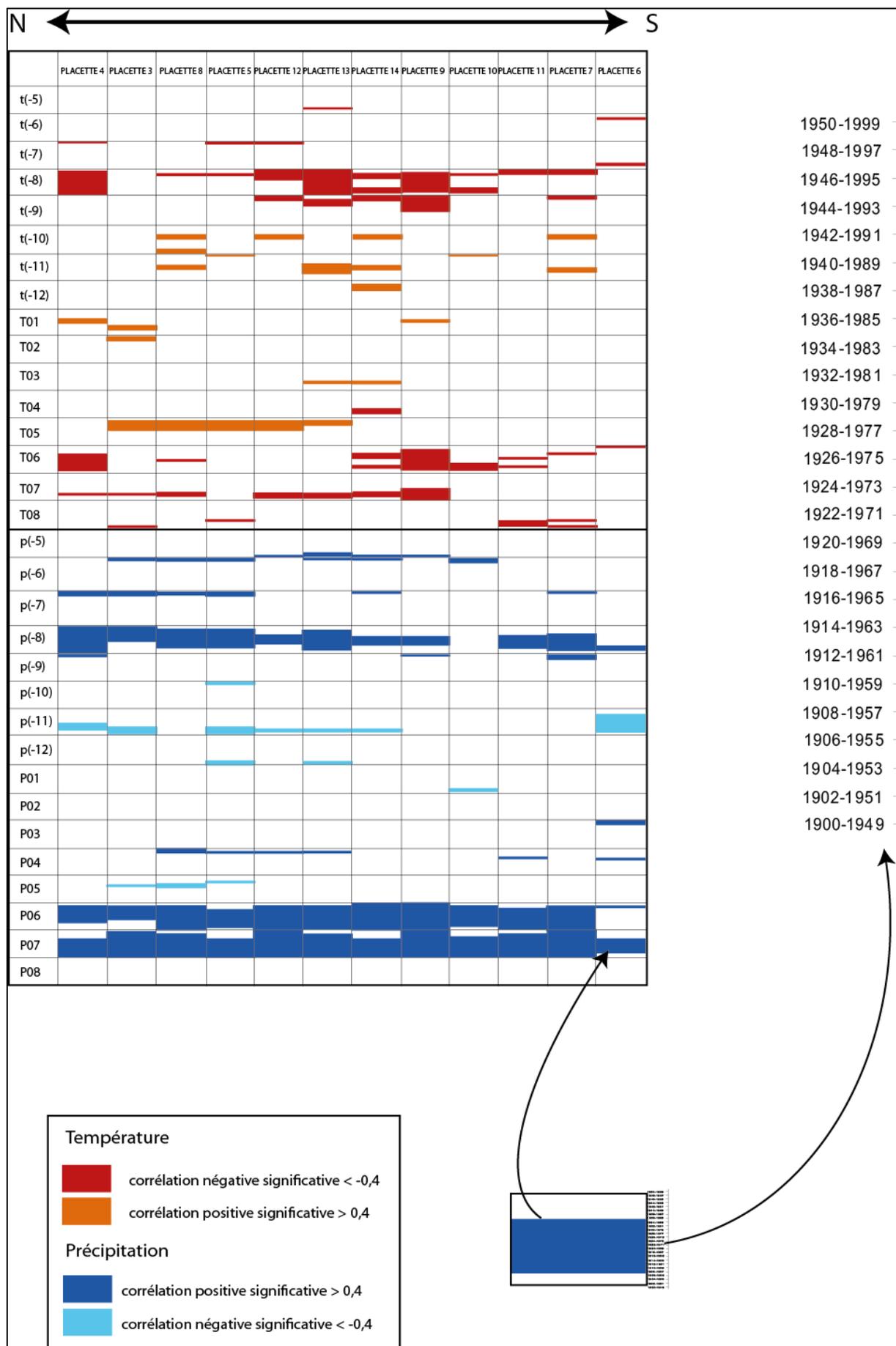


Figure 36 : Fonctions de réponse de la relation cerne-climat, dans le temps (fenêtre de 50 ans sur la période 1900-2000) à l'échelle du massif du Vercors.

5.1 : Echelle temporelle

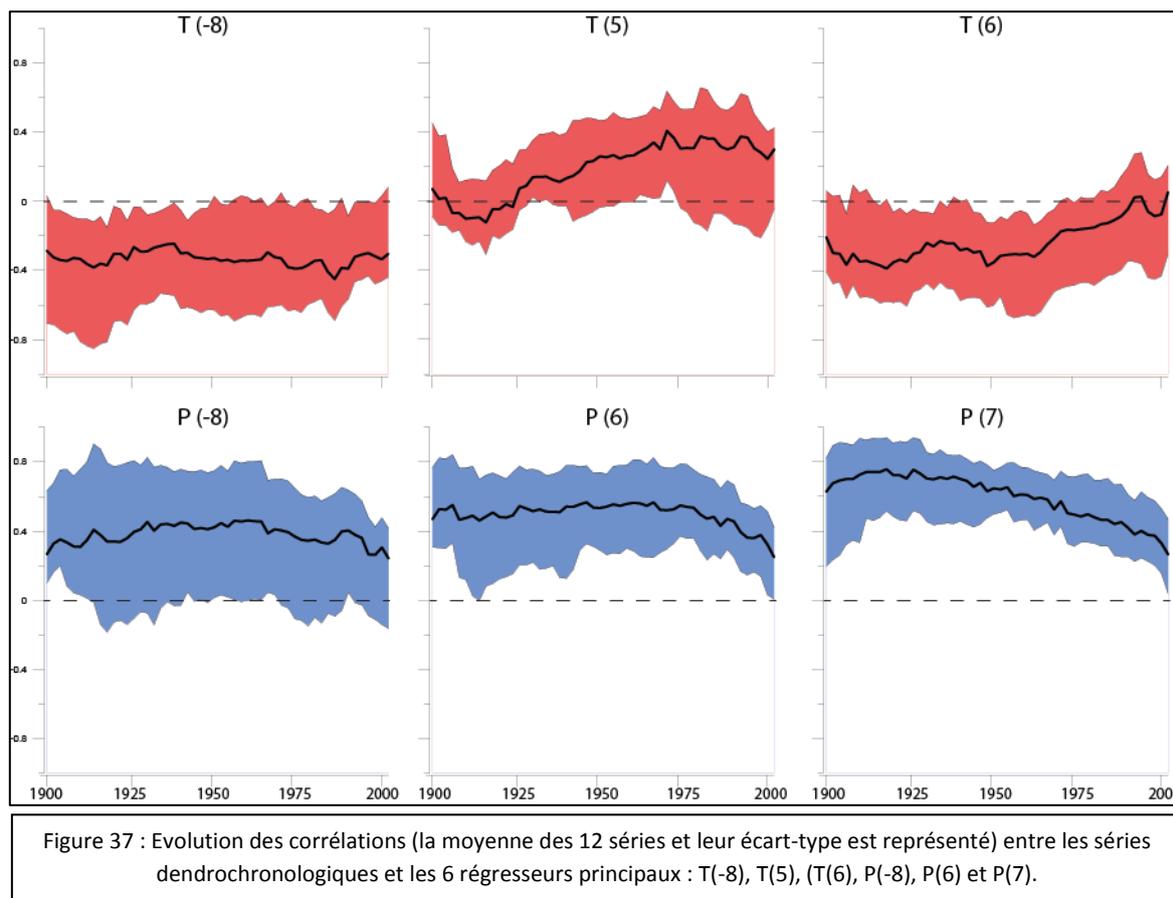
L'analyse diachronique de la relation cerne-climat à l'échelle du massif du Vercors peut être résumée en 6 points principaux :

- La relation positive avec les précipitations de juin et de juillet de l'année n est stable sur l'ensemble des périodes, sauf à la fin du XIXème ou elle est beaucoup moins présente, surtout pour le mois de juin,
- On retrouve généralement une relation positive avec les précipitations du mois d'août de l'année $n-1$, surtout au milieu du XIXème,
- A partir des années 1980, les précipitations du mois d'août de l'année $n-1$ ont une moindre influence et sont remplacées par les précipitations de juin $n-1$ et de juillet $n-1$,
- Les précipitations de novembre ont un rôle négatif au début de la période,
- Les températures automnales agissent positivement sur la croissance radiale au milieu de la période,
- Le rôle des températures est globalement plus important à partir des années 1980 alors que le poids des précipitations diminue.

6 régresseurs sont caractérisés par des corrélations importantes et significatives à l'échelle du Vercors sur l'ensemble du XIXème. Le fait qu'ils agissent sur la totalité des peuplements échantillonnés nous permet (i) de conforter l'idée que le climat est le facteur principal des variations de croissance de la pinède à crochets du massif du Vercors et (ii) qu'il existe une homogénéité des conditions climatiques sur cet espace.

La figure 37 représente l'instabilité temporelle de la sensibilité au climat des 12 populations, pour T(-8), T(5), T(6), P(-8), P(6) et P(7). Pour chaque mois, la moyenne des coefficients de corrélation des séries moyennes et l'écart-type de ces dernières sont représentés. Les précipitations estivales, principal facteur de croissance jusqu'au milieu du XIXème, perd de l'importance dans la relation cerne-climat au profit des températures printanières et estivales. Au début des années 1900, les précipitations de juin de l'année n ont les plus fortes corrélations pour l'ensemble des placettes. Cette relation s'atténue dès les années 1930 pour atteindre une corrélation moyenne de 0,3 vers les années 2000. Même si cette tendance est moins forte pour les précipitations de juin de l'année n et celles du mois d'août de l'année $n-1$, elle est bien présente.

Les températures d'août $n-1$ gardent une corrélation moyenne stable sur l'ensemble de la période tandis que les températures de mai et de juin de l'année n sont plus instables dans la relation cerne-climat. Alors qu'elle est négative au début du XIXème, la corrélation des températures de mai devient positive dans les années 1920 pour atteindre des coefficients moyens de 0,4 dans les années 1980. Le poids des températures de juin diminue à partir des années 1950 et voit son signe s'inverser dans les 1990. Mis à part T(-8) et T(5), les régresseurs climatiques principaux influencent moins fortement la croissance radiale à la fin du siècle.



5.2 : Echelle spatiale

Les écarts-types représentés dans la figure 37 indiquent des variations de réponse inter placettes. Ces variations sont plus ou moins fortes selon le régresseur étudié. Ainsi, les précipitations de juillet de l'année n semblent agir de manière similaire sur l'ensemble des peuplements. A l'inverse des précipitations du mois d'août $n-1$ où la variabilité entre placettes est beaucoup plus forte. A l'échelle temporelle, ces différences varient aussi. Au début du siècle, les peuplements réagissent de manière similaire aux températures de mai n . A partir des années 1950, les réponses sont plus variables comme dans les Pyrénées centrales (Tardif, 2003).

La figure 38 représente les corrélations entre ces six régresseurs et les différentes placettes échantillonnées. Plusieurs informations ressortent de ces figures :

- Les corrélations avec les précipitations sont les plus fortes dans le temps et dans l'espace,
- La placette la plus au nord (P4) est la mieux corrélée aux données climatiques ; la placette 6, la plus au sud, et celle qui comporte les coefficients de corrélation les plus faibles,
- Les corrélations les plus fortes sont celles présentes durant la première moitié du XIXème entre les précipitations du mois d'août de l'année $n-1$ et les placettes situées au centre du massif,
- Les températures de mai ont une influence positive sur les placettes plutôt au début du siècle au nord et en fin de période pour les peuplements situés au centre et au sud,
- La placette 6 est celle qui se différencie le plus dans sa relation qu'elle peut avoir avec les régresseurs climatiques.

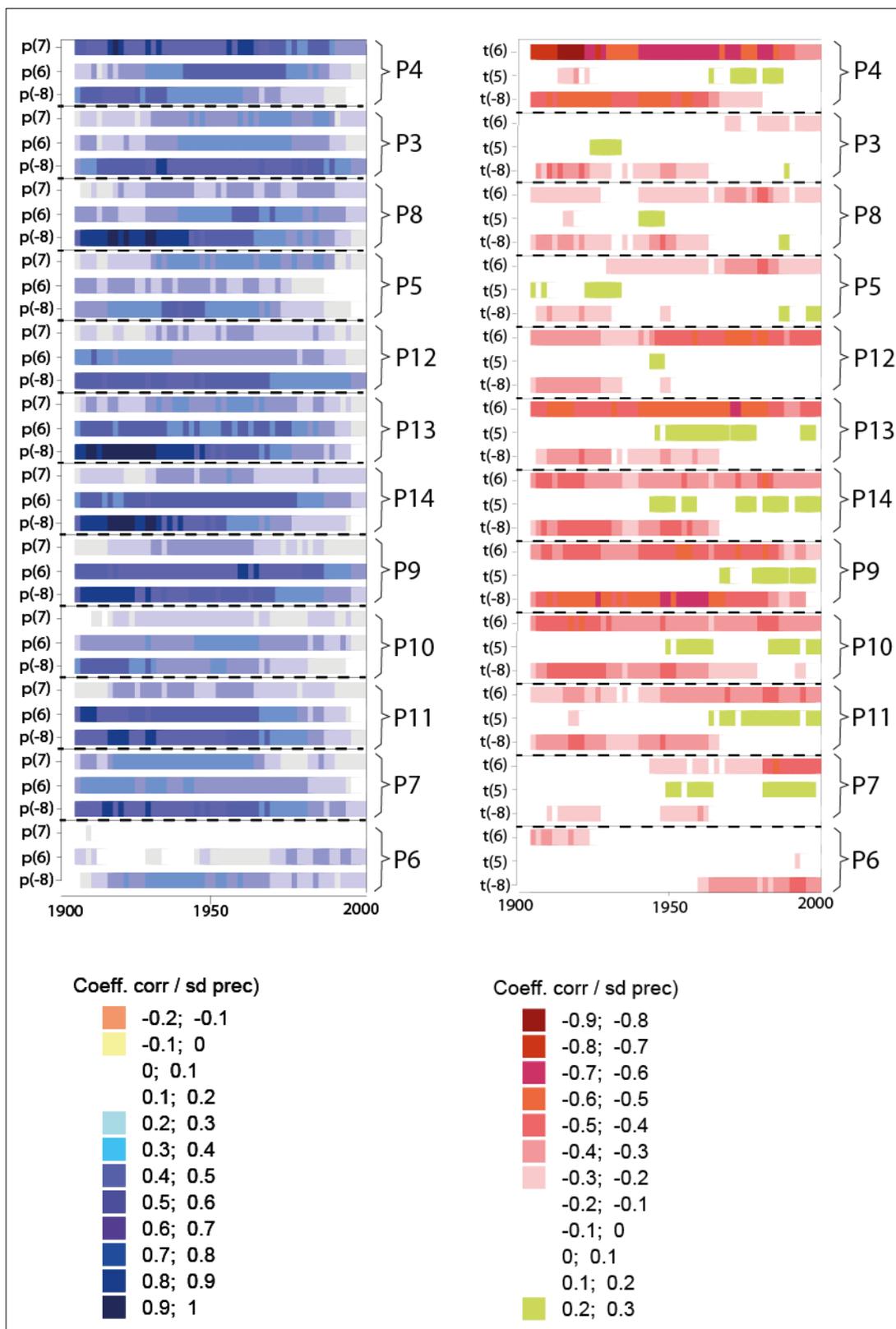


Figure 38 : Représentation des fonctions de réponse mobiles des 6 régresseurs principaux pour chaque placette échantillonnées.

Chapitre IV : Interprétation des résultats

1. Variations de croissance des séries standardisées

La standardisation des séries permet de faire ressortir le signal climatique du signal dendrochronologique. Les résultats montrent des variations interannuelles à l'échelle des peuplements mais aussi à l'échelle du massif. La période de forte croissance visible sur l'ensemble de la pinède à crochets entre 1950 et 1960 semble être le témoignage d'une décennie où les conditions écologiques ont été particulièrement favorables à *Pinus uncinata*. Le fait que cette augmentation de la taille des cernes annuels soit visible sur l'ensemble des placettes indique que cette tendance est d'origine climatique. Ces résultats ont aussi été observés sur le massif de Belledonne pour plusieurs espèces ligneuses (Petitcolas, 1998).

Les variations interannuelles de croissance sont directement liées aux fluctuations du climat (Mérian, 2012). Il semble donc que si les coefficients de variation des placettes situées au sud du massif sont plus importants que ceux des autres placettes, c'est dû au fait que les conditions climatiques sont plus fluctuantes au sud.

Nous avons calculé pour les deux points de grilles les plus éloignés l'un de l'autre sur l'axe latitudinal, leur coefficient de variation pour les températures et les précipitations, entre 1900 et 2003. Les coefficients de variation des précipitations indiquent des résultats pluviométriques similaires au sud (0,57) et au nord du massif (0,55). Au niveau des températures, elles sont plus variables au nord (0,93 contre 0,76 au sud). Face à ces résultats, rien n'indique que la plus forte variabilité de croissance des arbres au sud soit due à des conditions climatiques plus instables.

2. Fonctions de réponse simples

L'analyse de la relation cerne-climat à l'échelle infra annuelle indique des relations importantes entre la croissance radiale des peuplements et les conditions climatiques. **Les précipitations de juin et de juillet de l'année n sont le principal facteur explicatif de la croissance radiale des pins à crochets présents sur le massif du Vercors.** Comme le soulignait déjà Rolland (1995), l'espèce est plus sensible aux précipitations qu'aux températures. En d'autres termes, plus il pleut durant ces mois, plus la largeur du cerne annuel est importante. Les relations qu'il existe avec les autres régresseurs climatiques indiquent que **ces peuplements sont sensibles aux sécheresses estivales de l'année n et $n-1$.** Les corrélations négatives élevées avec les températures de $T(-7)$, $T(-8)$ et $T(6)$ révèlent un stress du pin à crochets lorsque les températures estivales sont anormalement élevées. De même que les corrélations positives avec les précipitations de $P(-7)$, $P(-8)$, $P(6)$ et $P(7)$ dévoilent la faible résistance des peuplements aux étés déficitaires en eau.

Ces résultats sont dans la continuité des études précédentes réalisées sur le pin à crochets à l'échelle du sillon alpin (Rolland *et al.*, 1995 ; Petitcolas, 1998 ; Frelechoux *et al.*, 2004).

Les températures et les précipitations d'avril et de mai de l'année n et $n-1$ sont favorables aux peuplements. Ces mois correspondent au début de la période végétative ; le pin à crochets est favorisé par des printemps chauds et humides, comme de nombreuses espèces européennes (Mérian, 2012).

Les corrélations significatives sont principalement présentes durant les mois de printemps et d'été ; il semble donc logique que les conditions climatiques automnales et hivernales aient une faible influence sur les peuplements, périodes de l'année où l'arbre est en dormance. Toutefois, il est intéressant d'observer les

paramètres climatiques sur l'ensemble de l'année car ils peuvent avoir une influence au niveau de la croissance radiale lorsque celle-ci est tardive ou précoce où bien lorsqu'ils impactent les réserves hydriques.

Les températures et les précipitations de novembre de l'année $n-1$ indiquent des corrélations non négligeables. La croissance radiale est plus importante lorsque le mois de novembre a été chaud et sec. Cette espèce est particulièrement affectée par des températures exceptionnellement basses en automne (Petitcolas, 1998). L'ensemble des données dendrochronologiques indique des relations positives pour les températures et négatives pour les précipitations durant les mois hivernaux. Cependant, ces relations ne sont pas significatives.

C'est la placette située la plus au nord qui est la plus sensible à la sécheresse du mois d'août $n-1$. Le gradient latitudinal est principalement visible durant les saisons de transition, en automne et en hiver, où les régresseurs climatiques sont moins limitants (Mériani, 2012). Les placettes au sud sont plus influencées par les températures d'octobre $n-1$ et d'avril, ainsi que par les précipitations de novembre $n-1$. A l'inverse, la relation avec les températures de mai de l'année n est plus visible au nord. Au printemps, lors de la croissance végétative, des températures élevées vont d'abord profiter aux populations méridionales, pour agir ensuite sur celles localisées plus au nord, où la période végétative est sans doute plus tardive.

3. Années caractéristiques et paramètres climatiques

L'augmentation de l'occurrence des années caractéristiques à partir des années 1940 et plus particulièrement depuis le début des années 1980 laisse à penser que les conditions climatiques sont de plus en plus extrêmes à partir du milieu du XIXème ou bien que la dérive climatique entraîne progressivement des modifications stationnelles moins favorables à l'espèce, augmentant sa sensibilité au climat.

La figure 39 résume pour chaque année caractéristique (auxquelles au moins 50% des placettes ont répondu) les anomalies climatiques de l'année précédente et de l'année n . Au niveau des températures et des précipitations, on s'aperçoit que ces années sont atypiques. Mais ces anomalies sont très variables à l'échelle mensuelle. Les pins à crochets du massif du Vercors sont donc sensibles à des scénarios climatiques différents. En 1984 par exemple, les précipitations du mois d'août sont fortement déficitaires, à l'inverse de 1986, où elles sont abondantes.

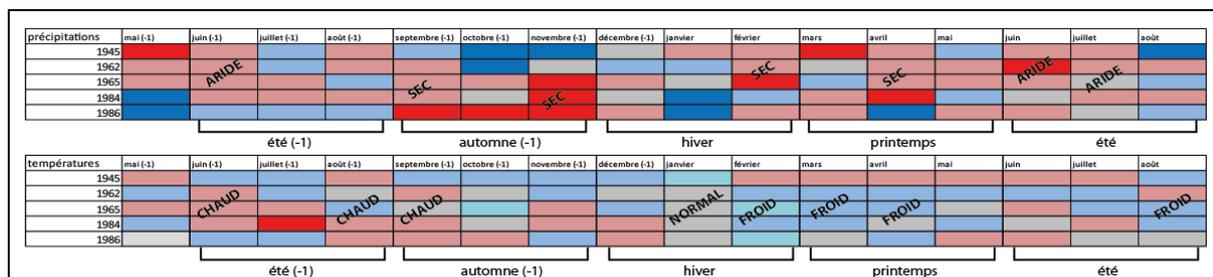


Figure 39 : Représentation simplifiée des anomalies climatiques des mois de l'année $n-1$ et de l'année n ayant une forte influence sur la croissance radiale pour les 5 années caractéristiques principales.

D'une manière générale, les années où une grande majorité des pins à crochets produit un cerne mince sont caractérisées par un déficit pluviométrique pour l'année n et $n-1$ combiné à un été précédent chaud, ainsi qu'une fin d'hiver et un printemps froid. Le manque d'eau et le froid tardif en période végétative ne permet pas aux arbres de se développer normalement. Ce phénomène perdure lorsque l'été reste chaud et sec. Ils semblent que de fortes ou faibles précipitations en automne perturbent la croissance radiale.

La relation entre les principaux régresseurs climatiques du pin à crochets (voir Ch IV. 2) et les *Pointer Years* est visible. Les années où les arbres ont le plus souffert sont globalement des années où le printemps est froid et sec et où les étés sont chauds et arides.

Certaines années caractéristiques ressortent plus selon le positionnement géographique des placettes. En 1965 par exemple, ce sont les placettes situées au nord et au centre du massif qui ont enregistré le plus de cernes minces. Cette année-là a été particulièrement marquée par un déficit au niveau des températures et des précipitations sur l'année n et $n-1$. A l'inverse, 1986 est plus marquée au sud. L'été 1985 est chaud et humide, l'automne très sec. Le mois de janvier enregistre de fortes précipitations et les températures anormalement froides jusqu'en mai laissent à penser que le manteau neigeux a été important et tardif cette année-là, d'autant que les précipitations d'avril sont fortement excédentaires. Il est intéressant de remarquer que l'année 1987 est caractéristique pour les peuplements de pins à crochets situés sur le massif de Belledonne (Petitcolas, 1998).

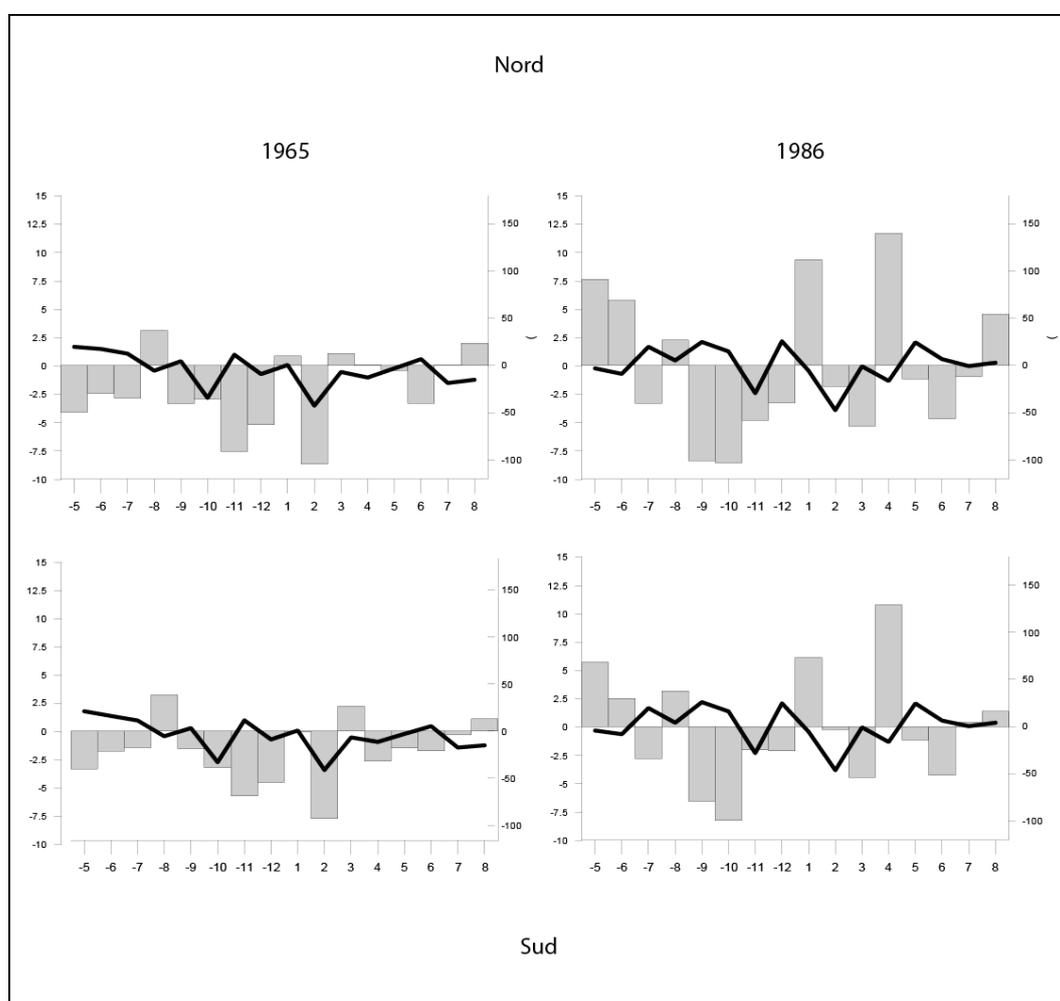


Figure 40 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations en 1965, 1965, 1985 et 1986, pour les points de grille situés sur les latitudes extrêmes de la partie orientale du massif du Vercors (données : Hystalp, 2007).

L'écart entre les conditions climatiques au nord et au sud du massif est cependant faible, en particulier pour les températures (figure 40). Les différences de réponse seraient donc principalement liées aux

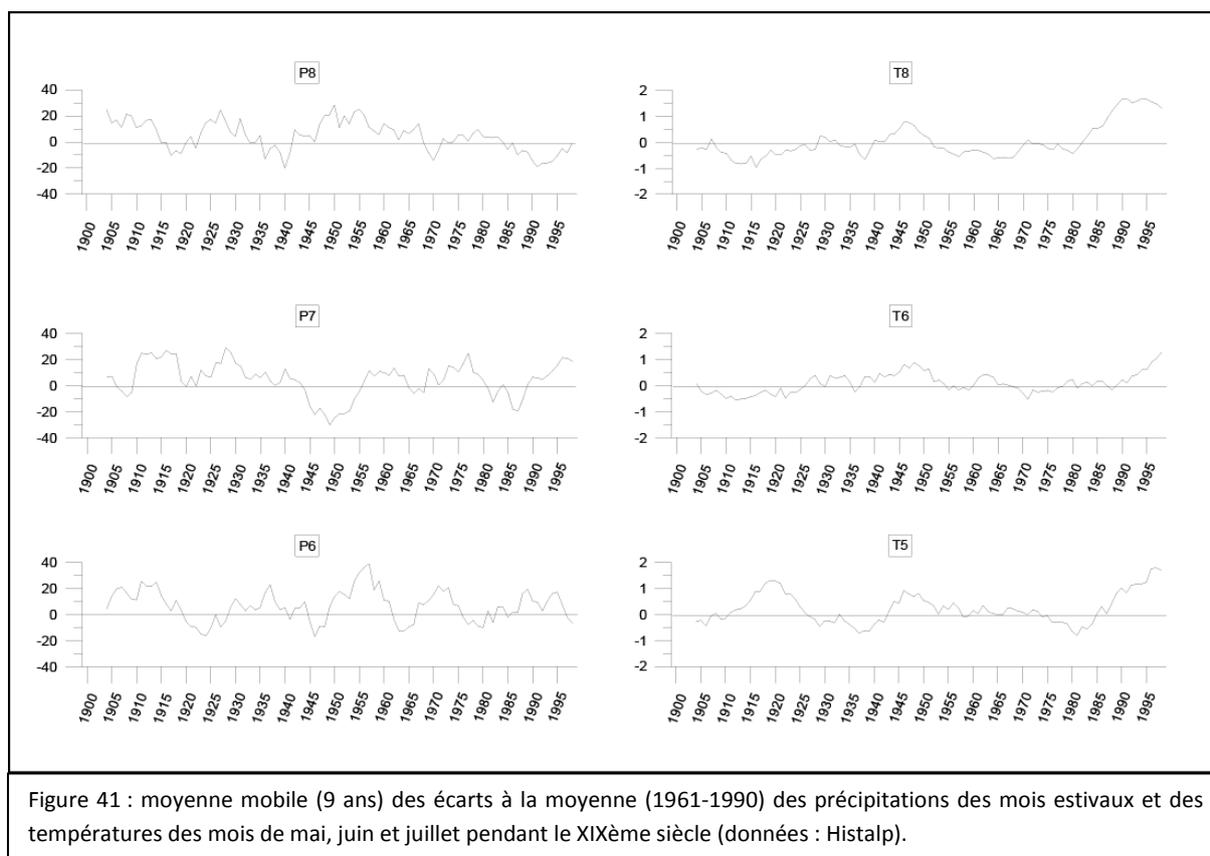
précipitations. En 1964, le déficit pluviométrique estival est légèrement plus important au nord, ainsi qu'en juin de l'année n . Ce qui pourrait expliquer un stress plus important pour ces populations.

Le mois de novembre 1985 est légèrement plus arrosé au sud. Sachant que le pin à crochets est corrélé positivement aux températures de ce mois, les placettes méridionales pourraient avoir moins souffert cette année-là. Il est cependant difficile de tirer des conclusions significatives de cette analyse spatiale, sachant (i) que la distance entre les placettes les plus éloignées n'est que de quelques dizaines de kilomètres et (ii) que les données climatiques utilisées sont susceptibles d'être éloignées de la réalité, surtout pour les précipitations (Bigot *et al.*, 2010). Il ne faut pas oublier non plus (iii) le rôle des conditions topographiques et édaphiques. Bien qu'une sélection rigoureuse des sites (voir Ch II. 1) permet la réduction des interférences entre la croissance radiale et le climat, il est impossible de les supprimer (Mérian, 2012).

4. Variabilité temporelle des fonctions de réponse

L'analyse de la relation cerne-climat dans un contexte limitant permet la mise en avant d'un facteur climatique dominant qui simplifie l'interprétation des fluctuations de croissance (Mérian, 2012).

6 régresseurs climatiques ressortent à l'échelle du massif : les précipitations d'août $n-1$, de juin et de juillet et les températures d'août $n-1$, de mai et de juin. La figure 41 indique la moyenne mobile (9 ans) des écarts à la moyenne (1961-1990) des précipitations des mois estivaux et des températures des mois de mai, juin et juillet pendant le XIXème siècle.



L'augmentation des corrélations entre les séries dendrochronologiques et les températures de mai et juin coïncide avec l'augmentation des températures à partir du début des années 1980. Bien que la relation avec T(-8) reste plutôt stable dans le temps, les températures augmentent aussi fortement.

Les précipitations ont tendance à augmenter pour les mois de juin et de juillet à cette même période (pour le mois d'août, l'augmentation des précipitations se fait à partir des années 1990). Ce changement de facteur limitant dans les années 1980 serait donc expliqué par une augmentation des précipitations en période estivale accompagnée d'une augmentation des températures en été. Le stress hydrique est moins élevé, la chaleur estivale devient le principal facteur limitant.

Les corrélations ont tendance à augmenter lorsque les variables climatiques sont de plus en plus contraignantes pour le pin à crochets. Par exemple, les séries dendrochronologiques sont fortement corrélées aux précipitations d'août $n-1$ dans les années 1910, période où les précipitations sont plus faibles, ainsi que les températures.

Durant le XIX^{ème}, cette variabilité de la relation cerne-climat est différente selon les placettes, particulièrement durant les mois où les régresseurs comportent des corrélations plus faibles (Mérian, 2012). Les placettes au nord du massif (sauf la P4) se corrént aux températures du mois de mai de l'année n principalement en début de siècle, alors que pour les placettes au centre et au sud, c'est en fin de siècle. Ces deux périodes correspondent aux deux augmentations des températures à l'échelle du siècle. Les placettes au nord seraient donc plus sensibles à la première, les autres à la seconde. L'explication pourrait résider dans le fait que pour les placettes aux plus hautes latitudes, les corrélations avec les températures de juin et d'août $n-1$ sont moins importantes que pour les autres placettes. Les températures de mai auraient alors plus de poids dans la relation cerne-climat.

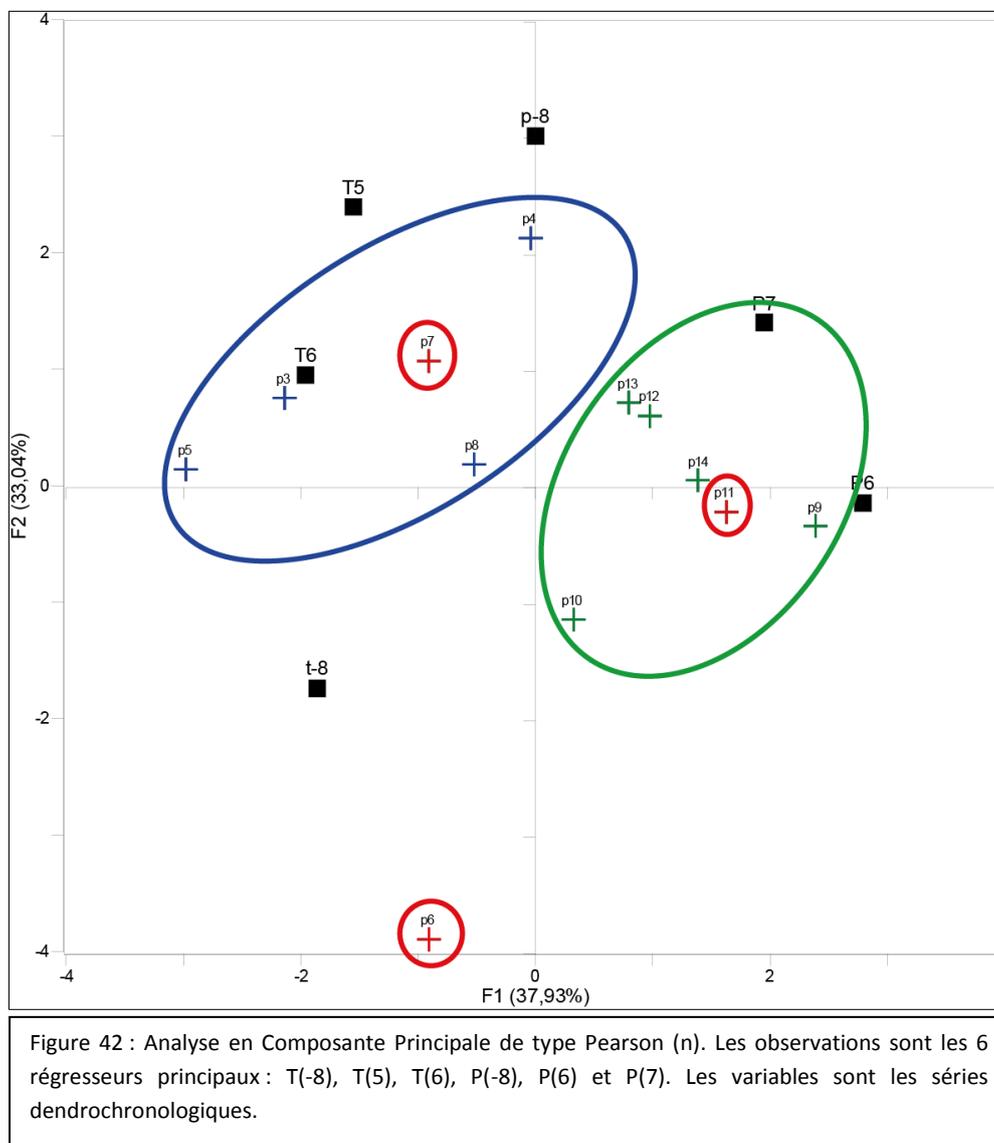
Il y a clairement de meilleures corrélations avec les régresseurs climatiques pour les placettes situées au nord et au centre, par rapport à celle localisées vers le sud du massif. Deux hypothèses principales peuvent justifier cette information. La première est que les conditions climatiques présentes au sud de la réserve sont plus favorables à l'espèce. Bien que ces conditions soient relativement similaires en vue des données climatiques Histalp, il se peut que des différences minimales favorisent les populations drômoises ; des précipitations plus importantes l'été par exemple. La seconde hypothèse serait que « les effets de site » sont plus importants au sud qu'au nord.

5. L'importance des facteurs topographiques et édaphiques

Les fortes corrélations obtenues entre les séries moyennes de chaque placette (voir Ch. 3.1) indiquent des variations de croissance communes à l'échelle du massif. L'importance des corrélations obtenues entre ces séries et 6 régresseurs climatiques principaux confirment l'hypothèse que ces variations de croissance sont principalement dues aux fluctuations du climat. Nous avons vu que ces corrélations varient en fréquence et en intensité selon les peuplements. Le gradient latitudinal semble être en partie responsable de ces spécificités. Les « effets de site » et les différences génotypiques intra-espèce, bien que pouvant être fortement réduits grâce à une méthodologie rigoureuse, restent des interférences dans la relation cerne-climat.

Les résultats de l'analyse en composante principale (de type Pearson (n)) sont représentés dans la figure 42. Les axes F1 et F2 expliquent respectivement 37,93% et 33,04% de la relation entre les séries dendrochronologiques des 12 placettes et leur relation aux 6 régresseurs principaux. On retrouve l'axe latitudinal, avec des placettes nord principalement corrélées aux températures de mai et de juin de l'année n et des placettes centrales où l'influence des précipitations de juin et de juillet est essentielle. Les placettes situées au sud en revanche, répondent de manière très différente aux régresseurs climatiques. La placette 6

notamment, se corrèle moins bien que les autres placettes aux variables climatiques. On sait cependant que cette dernière a été réalisée sur un site très particulier : il s'agit d'un éboulis ancien situé dans le cirque d'Archiane à basse altitude et dans un climat de type méditerranéen. La présence du pin à crochets dans cet espace, où les feuillus sont déjà situés bien plus haut en altitude, laisse présager de conditions topographiques et édaphiques particulières.



La concurrence inter-espèce ne semble pas avoir d'influence sur la variabilité de croissance radiale de nos peuplements. 8 placettes sur 12 présentent des variétés ligneuses autres que *Pinus uncinata*. Mais aucune interférence n'est visible entre la relation cerne-climat.

La P7 répond au climat de manière très similaire à celle des placettes au nord, tandis que la P11 se rapproche des placettes centrales. Les conditions topographiques et édaphiques entre la P11 et la P10 située à proximité, sont très similaires. Elles possèdent la même altitude et la P11 est aussi située sur les Hauts-Plateaux. Le fait qu'elle soit exposée nord et donc vers les placettes centrales pourrait être un facteur de sa similarité avec ces dernières. La réponse de la P7 est plus difficile à interpréter. Mais il a été démontré sur cette espèce que « cette sensibilité à l'aridité estivale est toujours plus marquée en adret » (Petitcolas,

1998). Or, les placettes au nord répondent plus significativement aux régresseurs climatiques et la P7 est la seule à être exposée vers le sud.

Conclusion et mise en perspective de l'étude

L'objectif principal de cette étude était d'établir l'existence ou non d'un lien entre la croissance radiale des pins à crochets du massif du Vercors et les variations du climat. L'homogénéité des séries dendrochronologiques et la comparaison entre leurs évolutions temporelles et la variabilité climatique ont permis de démontrer l'importance des précipitations et des températures mensuelles sur leur croissance. Afin d'étudier cette relation sur une échelle spatiale et temporelle, des fonctions de réponse ont été calculées pour chaque population. Les précipitations estivales se sont avérées être le principal facteur limitant dans la croissance radiale de *Pinus uncinata*, à l'échelle du XIXème. La comparaison de ces réponses entre chacune des placettes a permis d'établir des spécificités spatiales, où le gradient latitudinal joue un rôle important. La variabilité temporelle a été approchée grâce à l'utilisation des fonctions de réponse mobiles. Il s'avère que l'augmentation générale des températures dans les années 1980 coïncide avec l'apparition des températures estivales comme principal facteur limitant au détriment des précipitations. L'étude des années caractéristiques a permis quant à elle de consolider les résultats obtenus dans les réponses mobiles et d'identifier des « profils climatiques annuels » défavorables aux pins à crochets sur cet espace.

Ces résultats sont en phase avec les études antérieures réalisées sur le pin à crochets en Europe (Rolland et al., 1995 ; Shueller et al., 1995 ; Petitcolas, 1998 ; Lebourgeois et al., 2012). Sa croissance est principalement limitée par l'aridité estivale (Rolland et al., 1995 ; Petitcolas, 1998). Les régresseurs mis en avant sont cependant différents, avec un rôle plus accru de l'été $n-1$ pour les populations présentes sur le massif de Belledonne (Petitcolas, 1998) et une corrélation principale avec les précipitations de juillet $n-1$ pour les échantillons prélevés par Rolland en 1995 vers Villard-de-Lans (Rolland et al., 1995). Dans les montagnes méditerranéennes, ce sont les sécheresses de mai et de juin qui sont les plus limitantes (Lebourgeois et al., 2012). En revanche dans les Pyrénées centrales, ce sont les températures de novembre $n-1$ et de mai qui sont les plus fortement corrélées aux pins à crochets (Tardif, 2003).

1. Perspectives méthodologiques

Une des limites principale de notre étude repose sur le fait que ces résultats ont été élaborés à partir de données climatiques homogénéisées, les données mesurées sur le massif étant peu nombreuses dans le temps et dans l'espace. Depuis 2004, un observatoire écoclimatique est présent à l'échelle de la Réserve, réparti sur trois sites : Darbounouse, Gerland et Jardin du Roi. Une étude dendroécologique à proximité de ces trois stations météorologiques pourrait à l'avenir permettre une meilleure connaissance de la relation cerne-climat sur cet espace. Mais la prise en compte de l'échelle temporelle et spatiale serait alors fortement limitée, les stations n'enregistrant des mesures que depuis une dizaine d'année et sur un espace restreint du massif.

La prise en compte du manteau neigeux dans l'analyse augmenterait la précision de l'analyse. Les réserves hydriques présentes lors de la période végétative sont en effet fortement influencées par les précipitations solides sur les territoires de montagne. Cet aspect est d'autant plus amplifié sur notre site où la rétention des eaux précipitées est très faible et où la présence de micro-reliefs protège les névés des premières chaleurs printanières.

2. Vers une meilleure connaissance du climat alpin

Face à ces lacunes en matière de connaissance climatique, une étude dendroclimatique a été réalisée en concert avec celle-ci, afin de reconstituer la variabilité climatique du dernier siècle sur le territoire du Vercors, à travers une échelle spatiale et temporelle très fine (Comte, 2014).

Une comparaison rapide des résultats de notre étude et de ceux engendrés par Petitcolas sur le massif de Belledonne (1998) montre qu'il existe des réponses de croissance communes aux variabilités climatiques entre ces populations de pins à crochets. Réitérer la démarche sur d'autres massifs alpins, comme le massif de Chartreuse, permettrait d'obtenir une analyse des relations cerne-climat très précise, et ce à l'échelle régionale. Son élaboration pourrait apporter de meilleures connaissances quant aux microclimats engendrés par les effets de reliefs et améliorer la précision des modèles de circulation atmosphérique sur les Alpes.

3. La pinède à crochets du massif du Vercors

Ces résultats permettent aussi d'établir des pronostics sur l'évolution future de la pinède à crochets du massif du Vercors. Dans un contexte de réchauffement climatique accentué sur les reliefs, comment celle-ci va-t-elle évoluer ? Il a été démontré que l'augmentation des températures devrait être favorable à la croissance (Ozenda et al., 1991) et la présence de cette espèce dans des zones très arides en Espagne incite à penser que le pin à crochets est capable de supporter des températures beaucoup plus élevées que celles enregistrées à l'échelle du massif (Petitcolas, 1998). Mais l'élévation altitudinale des niches écologiques des espèces en aval engendrée par une hausse des températures risquerait d'entraîner de profondes perturbations. *Pinus uncinata* est en effet une espèce rustique, mais sensible à la concurrence (Rolland, 1996), et sa position déjà sommitale ne lui permet pas de migrer en amont.

Liste des figures

Figure 1 : Présentation des différentes parties d'un cerne de croissance d'un mélèze (source : WSL).....	p 9
Figure 2 : Etablissement d'une série dendrochronologique (d'après Schweingruber, 1988).....	p 10
Figure 3 : Schéma simplifié des facteurs naturels et de leurs interactions influençant la croissance radiale (d'après Mérian, 2012).....	p 12
Figure 4 : Aire de répartition de <i>Pinus uncinata</i> Mill. Ex Mirb. (Atlas Florae Europaeae, 1973).....	p 14
Figure 5 : Présentation générale du massif du Vercors.....	p 15
Figure 6 : Principaux secteurs du massif du Vercors et positionnement géographique (source : google earth, 2014)...	p 16
Figure 7 : Carte simplifiée des précipitations moyennes annuelles (d'après la carte des régions bioclimatiques, Delannoy, 1986).....	p 18
Figure 8 : Répartition des précipitations moyennes annuelles (1961-1990) en mm à l'échelle du massif du Vercors (données : Histalp, 2007).....	p 18
Figure 9 : Répartition des températures moyennes annuelles (1961-1990) en °C à l'échelle du massif du Vercors (données : Histalp, 2007).....	p 19
Figure 10 : <i>Pinus uncinata</i> dans le massif du Vercors (source : Labessoulhe, 2014).....	p 20
Figure 11 : Représentation cartographique des parties du massif situées à plus de 1700 mètres d'altitude.....	p 22
Figure 12 : Emplacement géographique de la vieille pinède à crochets sur la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors (d'après Hatem, 2010).....	p 23
Figure 13 : Analyse diachronique des surfaces arborées aux altitudes les plus hautes du massif du Vercors à partir des photographies aériennes de la campagne de 1948.....	p 24
Figure 14: vue sur les sommets orientaux du Vercors (photo orientée nord) depuis le Pas Morta (source : Labessoulhe, 2014).....	p 25
Figure 15: collage des carottes sur bois rainurés (source : Labessoulhe, 2014).....	p 26
Figure 16: ponçage sous ponceuse rotative sous trois tailles de grains (source : Labessoulhe, 2014).....	p 26
Figure 17: Comptage des cernes sous CooRecorder (source : labessoulhe, 2014).....	p 27
Figure 18 : Représentation simplifiée des différentes étapes de traitement en dendrochronologie.....	p 29
Figure 19: Double standardisation (d'après Mérian, 2012).....	p 30
Figure 20 : Diagrammes ombrothermiques des 5 points de grille de la base de données Histalp utilisés en approche dendroécologique.....	p 32
Figure 21 : Principales caractéristiques des placettes : coordonnées géographiques, altitude, exposition, caractéristiques topographiques et édaphiques, type de peuplement.....	p 36
Figure 22 : Localisation géographique et faciès paysager des 12 placettes échantillonnées (source : Labessoulhe, 2014).....	p 37

Figure 23 : Coefficients de corrélation inter-populations et corrélation moyenne.....	p 38
Figure 24 : Représentation des 12 séries dendrochronologiques standardisées (indice) ainsi que le nombre d'individu présent dans la série.....	p 40
Figure 25 : Représentation des coefficients de corrélation entre les 12 séries dendrochronologiques et les variables climatiques (températures et précipitations) pour le mois de mai n-1 jusqu'au mois d'août de l'année n (données climatiques issues d'Histalp, 2007) à l'échelle du XIXème siècle.....	p 41
Figure 26 : Représentation spatiale de l'intensité de la relation cerne-climat entre les 12 séries dendrochronologiques et les températures moyennes mensuelles entre le mois de mai n-1 et le mois d'août de l'année n (données climatiques issues de la base Histalp, 2007) à l'échelle du XIXème siècle.....	p 43
Figure 27 : Représentation spatiale de l'intensité de la relation cerne-climat entre les 12 séries dendrochronologiques et les précipitations moyennes mensuelles entre le mois de mai n-1 et le mois d'août de l'année n (données climatiques issues de la base Histalp, 2007) à l'échelle du XIXème siècle.....	p 45
Figure 28 : Années aux croissances négatives caractéristiques observées sur la pinède à crochets du massif du Vercors d'après le calcul des pointer years (d'après P. Mérian, 2012).....	p 47
Figure 29 : Pourcentage d'individus par série caractérisés par la présence d'un cerne mince pour les années identifiées comme caractéristiques.....	p 48
Figure 30 : Nombre de placettes identifiant une année caractéristique entre 1820 et 2013.....	p 49
Figure 31 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1944 et 1945 (données : Histalp, 2007).....	p 49
Figure 32 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1961 et 1962 (données : Histalp, 2007).....	p 50
Figure 33 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1964 et 1965 (données : Histalp, 2007).....	p 51
Figure 34 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1983 et 1984 (données : Histalp, 2007).....	p 51
Figure 35 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations sur l'ouest du Vercors en 1985 et 1986 (données : Histalp, 2007).....	p 52
Figure 36 : Fonctions de réponse de la relation cerne-climat, dans le temps (fenêtre de 50 ans sur la période 1900-2000) à l'échelle du massif du Vercors.....	p 54
Figure 37 : Evolution des corrélations (la moyenne des 12 séries et leur écart-type est représenté) entre les séries dendrochronologiques et les 6 régresseurs principaux : T(-8), T(5), T(6), P(-8), P(6) et P(7).....	p 56
Figure 38 : Représentation des fonctions de réponse mobiles des 6 régresseurs principaux pour chaque placette échantillonnées.....	p 57
Figure 39 : Représentation simplifiée des anomalies climatiques des mois de l'année n-1 et de l'année n ayant une forte influence sur la croissance radiale pour les 5 années caractéristiques principales.....	p 59

Figure 40 : Ecart à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations en 1965, 1965, 1985 et 1986, pour les points de grille situés sur les latitudes extrêmes de la partie orientale du massif du Vercors (données : Histalp, 2007).....p 60

Figure 41 : moyenne mobile (9 ans) des écarts à la moyenne (1961-1990) des précipitations des mois estivaux et des températures des mois de mai, juin et juillet pendant le XIXème siècle (données : Histalp).....p 61

Figure 42 : Analyse en Composante Principale de type Pearson (n). Les observations sont les 6 régresseurs principaux : T(-8), T(5), T(6), P(-8), P(6) et P(7). Les variables sont les séries dendrochronologiques.....p 63

Bibliographie

- ABRAMS MD., 2003. Where has all the white oak gone ? Bioscience, vol. 53-10, pp. 927-939
- ANDRE G., ANDRE M., 2008. Le pin à crochets (*Pinus uncinata* Ramond ex. DC. Var. *rotunda* [Link] Antoine) des tourbières : preuves historiques de son indégénat dans le massif Jurassien et dynamique des peuplements suite aux actions anthropozoogènes. Les Nouvelles Archives de la Flore jurassienne, 6, S.B.F.C., C.B.N.F.C., pp. 51-110
- AUER I., *et al.*, 2007. Histalp-historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of climatology, 27 :17-46, pp. 18-45
- BATLLORI E., GUTIERREZ E., 2008. Regional tree line dynamics in response to global change in the Pyrenees. Journal of Ecology, vol. 96-6, pp. 1275-1588
- BERGERON Y., 2000. The influence of Island and mainland lakeshore landscapes on Boreal forest-fire regimes. Ecology, vol. 72-6, pp. 1980-1992
- BIGOT S., ROME S., 2010. Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises. Evolution récente et conséquences potentielles futures. Echogéo, 14 (2010), septembre 2010/novembre 2010, 21p.
- BLANCHARD R., 1918. Le contraste climatique entre Vercors et Diois. Recueil des travaux de l'IGA, tome 6-4, pp. 427-446
- CARRER M., URBINATI C., 2004. Age dependent tree ring growth responses to climate of *Larix decidua* and *Pinus cembra* in the Italian Alps. Ecology, vol. 85, pp. 730-740
- DELANNOY J-J., 1982. Les variations spatio-temporelles de la corrosion karstique dans un massif de moyenne montagne: le Vercors. Revue de Géographie Alpine, tome 70-3, pp. 241-255
- EILMANN B., *et al.*, 2009. Drought-induced adaptation of the xylem in Scots pine and pubescent oak. Tree physiology, vol.29-8, pp. 1011-1020
- FRELECHOUX F., *et al.*, 2004. Spatio-temporal pattern of bog pine (*Pinus uncinata* var. *rotundata*) at the interface with the Norway spruce (*Picea abies*) belt on the edge of a raised bog in the Jura Mountains, Switzerland. Ann. For. Sci., vol. 61-4, pp. 309-318
- GARNIER E., 2010. Bassesses extraordinaires et grandes chaleurs. 500 ans de sécheresses et de chaleurs en France et dans les pays limitrophes. La Houille Blanche, n°4-2010, 17p.
- HANDA IT., *et al.*, 2006. A test of the tree-line carbon limitation hypothesis by in situ CO2 enrichment and defoliation. Ecology, vol. 86-5, pp. 1288-1300
- HAROLD C., FRITTS, 1971. Dendroclimatology and Dendroecology. Quaternary research 1, pp. 419-449
- HATEM H., 2010. Mutation des paysages et évolution de la biodiversité en relation avec le pastoralisme depuis 150 ans. Le cas de la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors (Alpes du Nord, France). Thèse Doct., Université de Grenoble, Institut de Géographie Alpine, 184p.

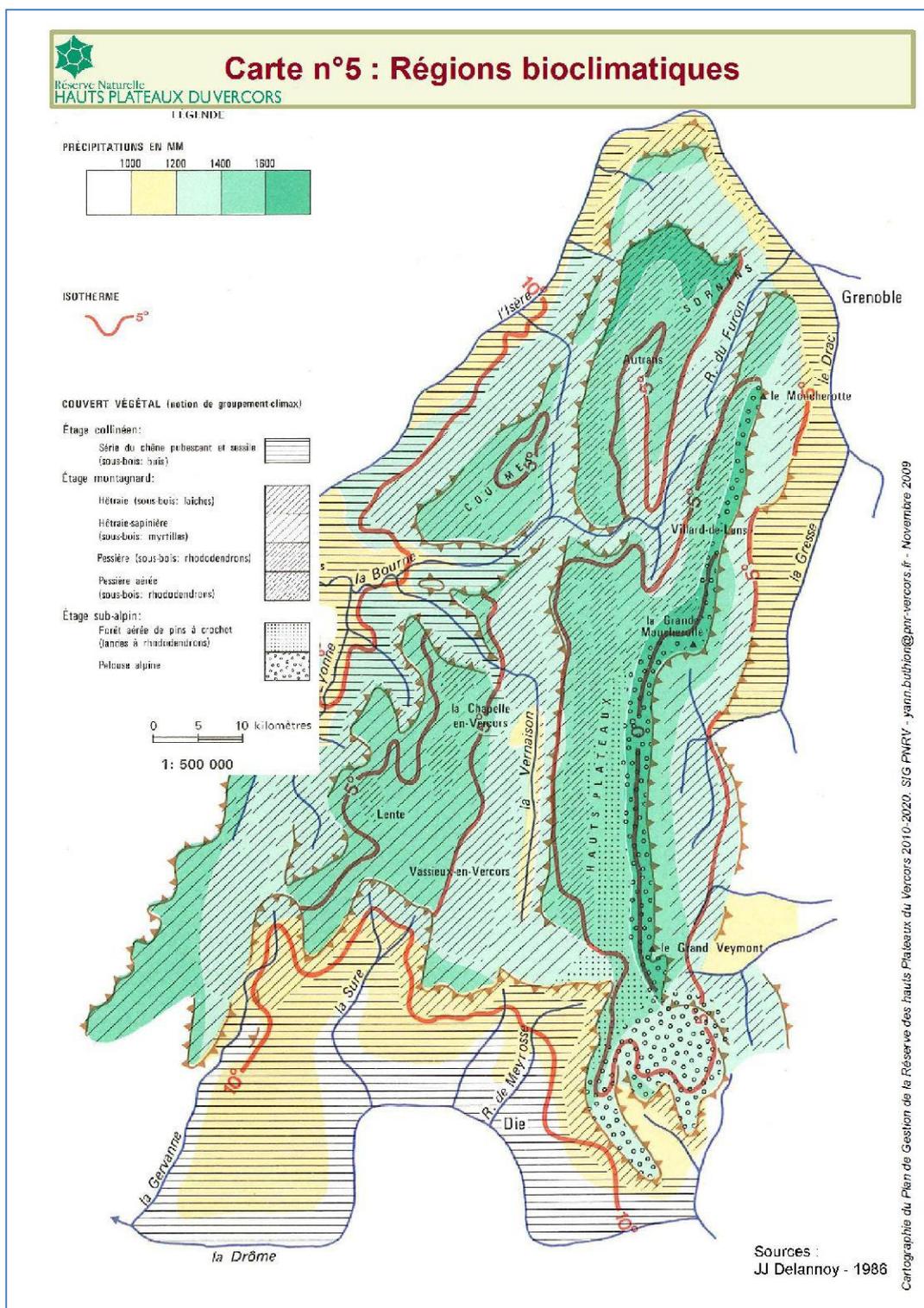
- HOLZAUSER H., MAGNY M., ZUMBUHL HJ., 2005. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *Holocene*, vol. 15-6, pp. 789-801
- KELLER C., *et al.*, 2000. Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO2 increase using a statistical model. *Copeia*, Issue 1, pp. 157-165
- KELLER T., *et al.*, 2000. Impact d'un scénario climatique de réchauffement global sur la croissance des arbres. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la vie/Life Sciences* 323 (2000), pp. 913-924
- KITZBERGER T., STEINAKER DF., VELEN TT., 2000. Effects of climatic variability on facilitation of tree establishment in northern Patagonia. *Ecology*, vol. 81-7, pp. 1914-1924
- LAMBERT G., LAVIER C., 1990. Dendrochronologie et préhistoire. *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 87-5, pp. 143-152
- LEBOURGEOIS F., MERIAN P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. LERFOB, AgroPariTech, Centre de Nancy, 85p.
- LEBOURGEOIS F., *et al.*, 2012. Réponse au climat et à ses variations au cours du XXème siècle du sapin pectiné, du hêtre, des pins noirs, sylvestre et à crochets en contexte méditerranéen montagnard. *Revue Forestière Française*, vol 64-2, pp. 107-123
- LEBOURGEOIS F., RATHGEBER C., ULRICH E., 2010. Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance d'*abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. *Revue Forestière Française*, LXII, 1-2010, pp. 7-23
- LOPEZ SAEZ J., 2011. Reconstruction de l'activité des glissements de terrain au moyen d'une approche dendrogéomorphologique. Thèse Doct., Université de Grenoble, 372p.
- MEIER C., *et al.*, 2014. Mountain forest growth response to climate change in the northern limestone Alps. *Trees*, doi. 10. 1007/5 00468-014-0994-1., 11p.
- MERIAN P., 2012. Variations spatio-temporelles de la réponse au climat des essences forestières tempérées; quantification du phénomène par approche dendroécologique et influence de la stratégie d'échantillonnage. Thèse Doct., Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroPariTech), 454p.
- MOISSELIN J-M., *et al.*, 2002. Les changements climatiques en France au XXème siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de températures et de précipitations. *La Météorologie*, n°38, août 2002, pp.45-56
- NIKLISSON M., GRANSTROM A., 2000. Numbers and sizes of fires: long-term spatially explicit fire history in a Swedish boreal landscape. *Ecology*, vol. 81-6, pp. 1500-1516
- NOWACKI GJ., ABRAMS MD., 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from resettlement-origin oaks. *Ecological monographs*, vol. 67-2, pp. 225-249
- OFFNER J., 1920. Les étages de végétation du massif du Vercors. *Revue de géographie alpine*, tome8-1, pp. 125-140

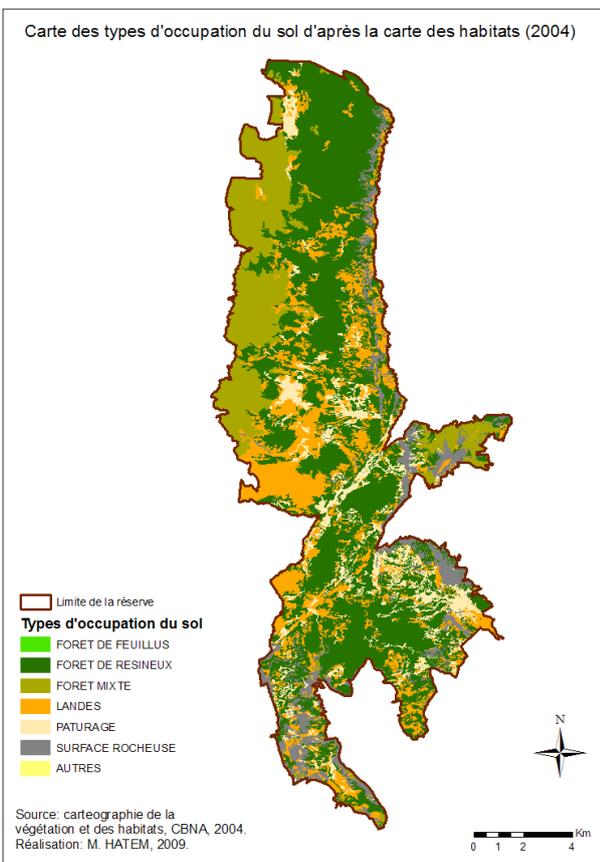
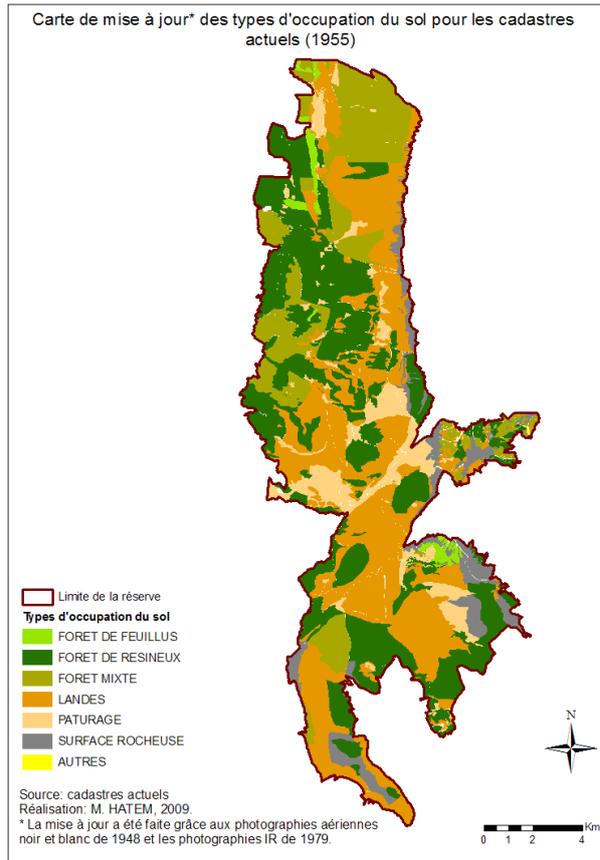
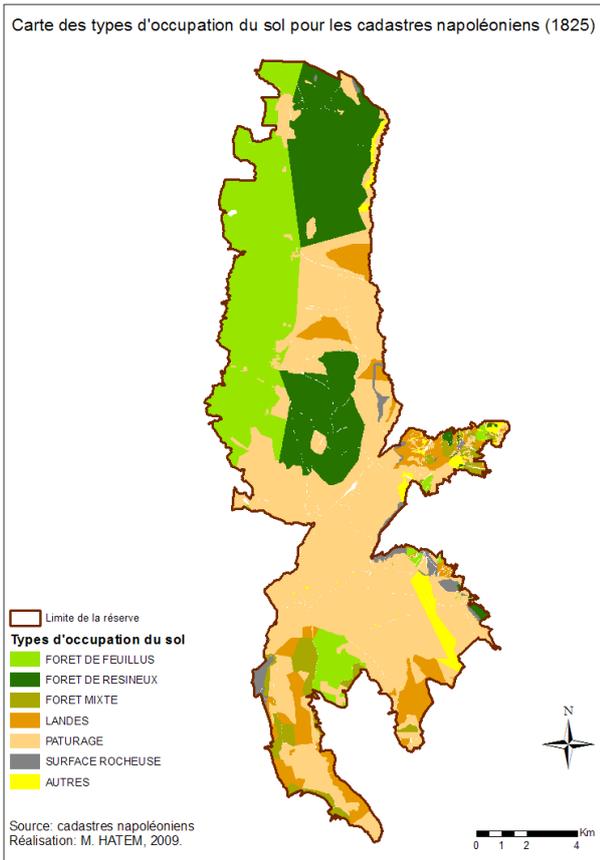
- OZENDA P., BOREL J-L., 1991. Les conséquences écologiques possibles des changements climatiques dans l'Arc alpin. Rapport Futuralp 1991 n°1, 49p.
- PAYETTE S., FILION L., 2010. La Dendroécologie : Principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval. 758p.
- PETITCOLAS V., 1998. Dendroécologie comparée de l'épicéa, du mélèze, du pin cembro et du pin à crochets en limite supérieure de la forêt dans les Alpes françaises : influence de la variabilité macro-écologique. Thèse Doct., Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 188p. + annexes
- PRUDENT-RICHARD G., *et al.*, 2008. Changements climatiques dans les Alpes : impacts et risques naturels. Rapport technique n°1 de l'ONERC, 100p.
- RIGLING A., 2001. Ecological interpretation of tree-ring width and intraannual density fluctuations in *Pinus sylvestris* on dry sites in the central Alps and Siberia. Can J. For. Res., vol. 31, pp. 18-31
- RITA A., *et al.*, 2014. Differential climate-growth relationships in *Abies alba* Mill. And *Fagus sylvatica* L. in Mediterranean mountain forests. Dendrochronologia, vol. 32-3, pp. 220-229
- ROLLAND C., 2001. Influence du pâturage sur la germination et la survie des semis de pin à crochets dans la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors. Suivi expérimental et étude bibliographique, 124p.
- ROLLAND C., FLORENCE-SCHUELLER J., COOPER J., 1995. Croissance comparée du pin à crochets et de l'épicéa (*Pinus uncinata* Ram. et *Picea abies* karst.) sur dalle calcaire karstifiée en moyenne montagne tempérée (Vercors, France). Revue de Géographie Alpine. 1995, tome 83-1, pp.17-32
- ROLLAND C., 1996. Croissance du pin à crochets (*Pinus uncinata* Mill. ex. Mirb.) dans la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors. Revue Forestière Française, XLVIII-2-1996, pp.144-152
- ROME S., BIGOT S., DUMAS D., 2009. Les extrêmes thermiques et la circulation atmosphérique dans les Préalpes Françaises (massif du Vercors, 2004-2008). Geographia Technica, numéro spécial, 2009, pp. 395-400
- SCHUELLER F., ROLLAND C., 1995. Influence de l'altitude, de l'exposition et du climat sur la croissance du pin à crochets (*Pinus uncinata* ram.) en Cerdagne (Pyrénées orientales françaises). Pirineos, 23a. 34, Jaca, pp. 145-146
- SOLANKI SK., *et al.*, 2004. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11 000 years. Nature, vol. 431-7012, pp. 1084-1087
- STUIVER M., REIMER PJ., 1998. INTCAL 98 radiocarbon age calibration, 24 000-0 cal BP. Radiocarbon, vol. 40-3, pp. 1041-1083
- TARDIF J., 2003. Spatiotemporal variability in tree growth in the central Pyrenees : climatic and site influences. Ecological monographs, vol. 73-2, pp. 241-257
- VEBLEN TT., *et al.*, 1999. Fire history in northern Patagonia: The roles of humans and climatic variation. Ecological monographs, vol. 69-1, pp. 47-67

Annexes

Annexe 1: Carte des regions bioclimatiques (Delannoy, 1986).....	p 74
Annexe 2: Cartes des types d'occupation du sol sur la Réserve Naturelle des Hauts-plateaux du Vercors, en 1825, 1955 et 2004 (Hatem, 2009).....	p 75
Annexe 3: Données climatiques et années caractéristiques.....	p 76
Annexe 4 : Evolution des régresseurs climatiques et de leurs influences au XXème siècle.....	p 80
Annexe 5: Illustrations photographiques de la campagne d'échantillonnage.....	p 92

Annexe 1: Carte des regions bioclimatiques (Delannoy, 1986)

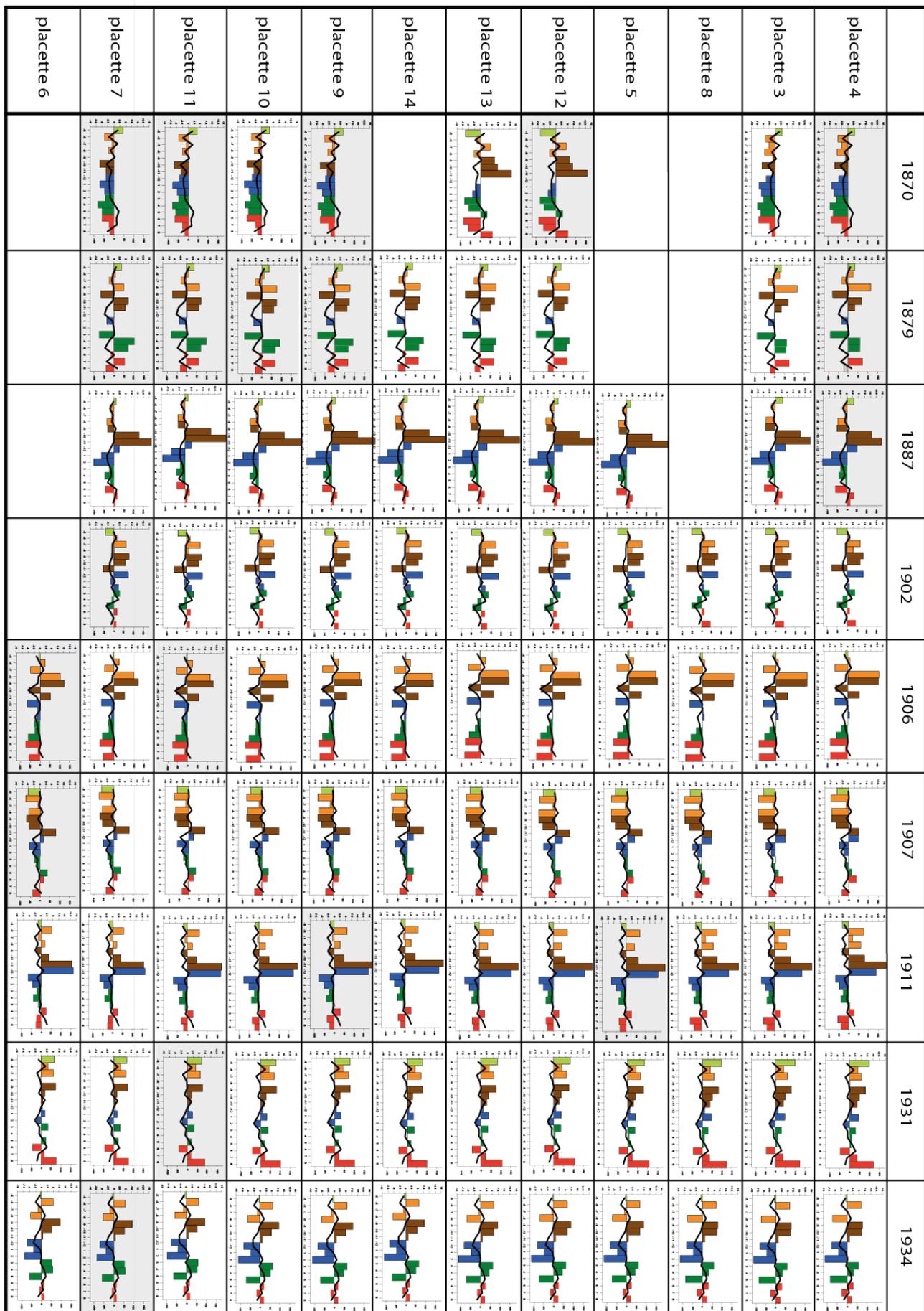


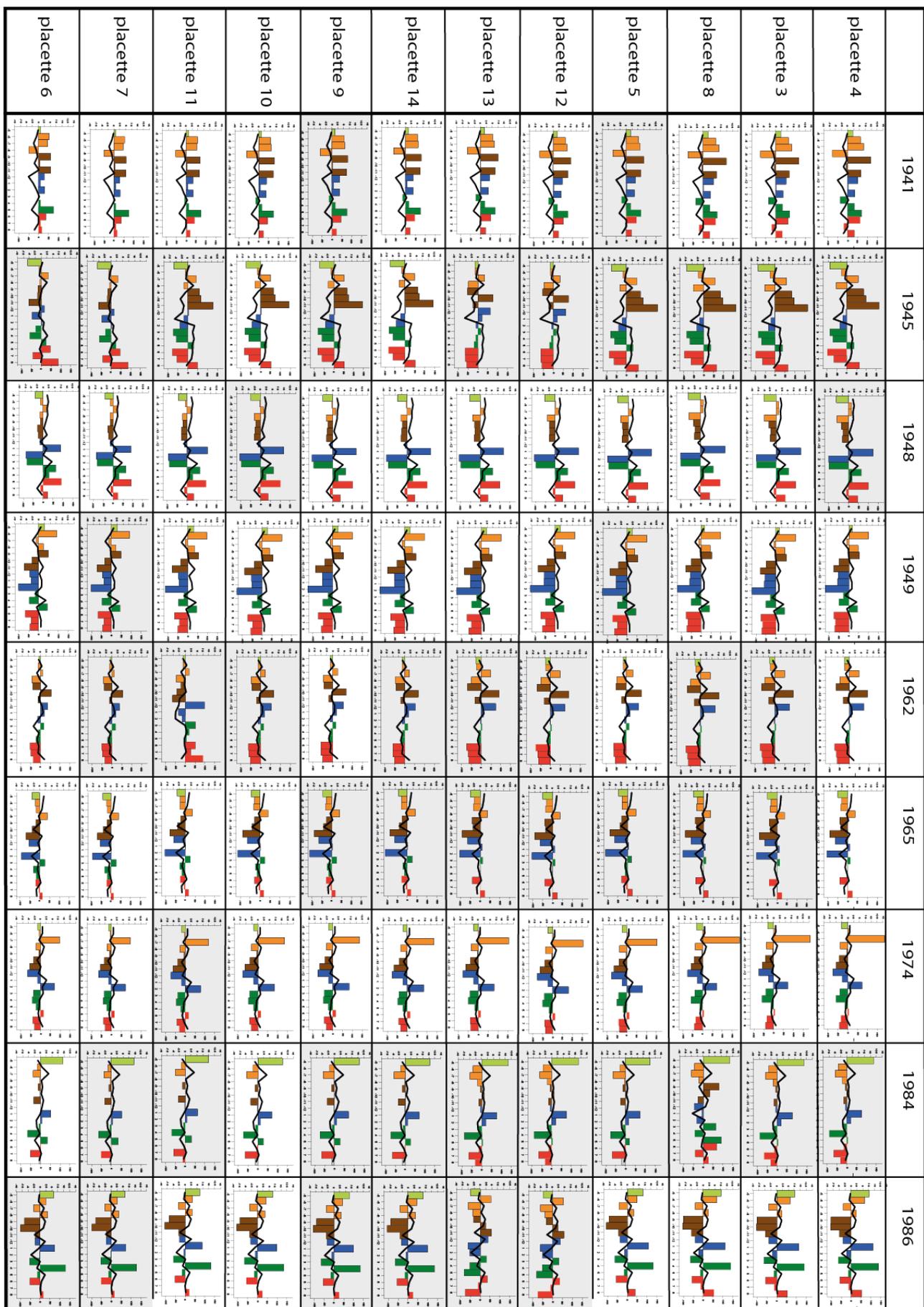


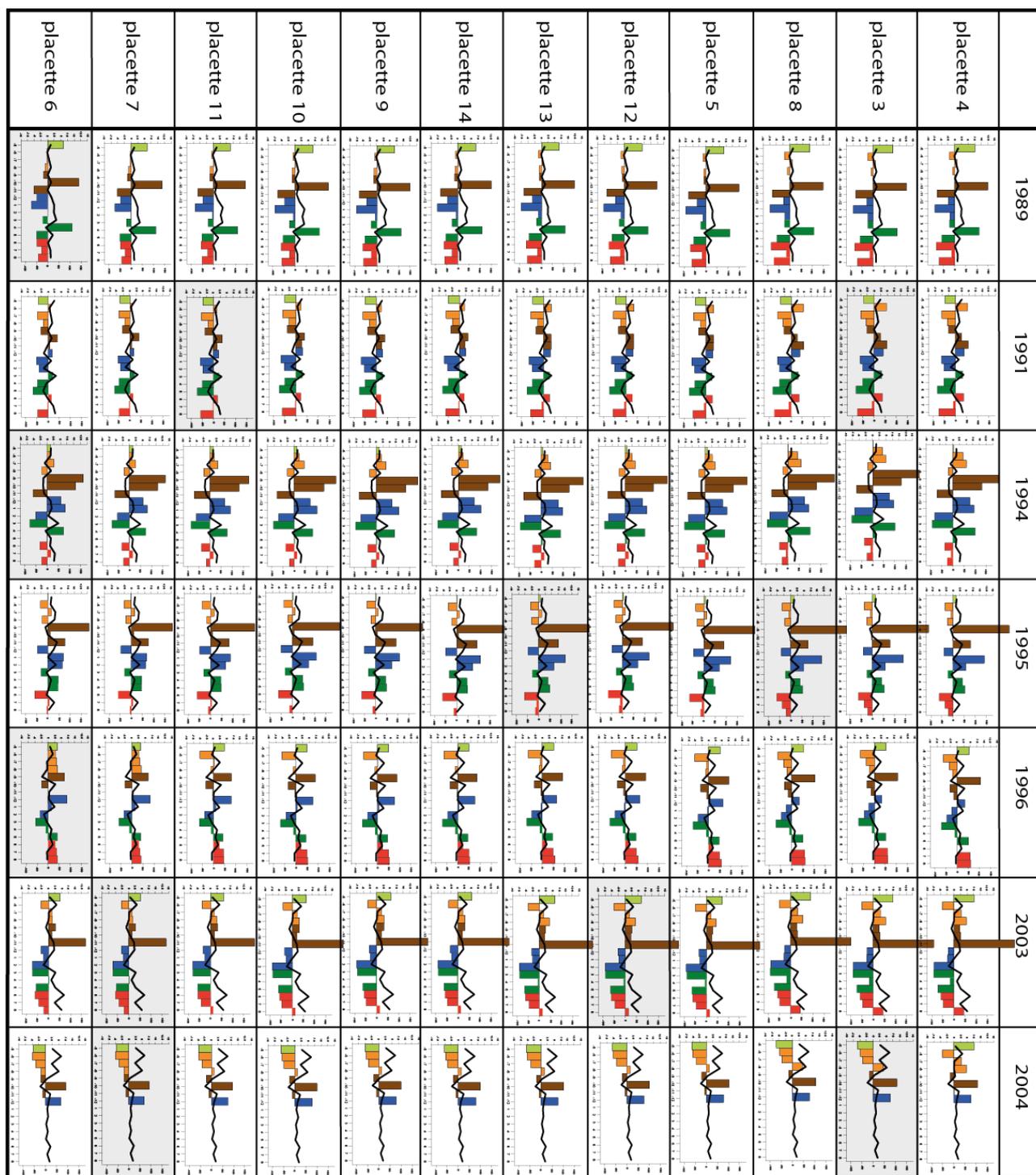
Annexe 2: Cartes des types d'occupation du sol sur la Réserve Naturelle des Hauts-plateaux du Vercors, en 1825, 1955 et 2004 (Hattem, 2009)

Annexe 3 : Données climatiques et années caractéristiques

	1824	1832	1836	1838	1839	1849	1855	1865	1868
placette 4									
placette 3									
placette 8									
placette 5									
placette 12									
placette 13									
placette 14									
placette 9									
placette 10									
placette 11									
placette 7									
placette 6									







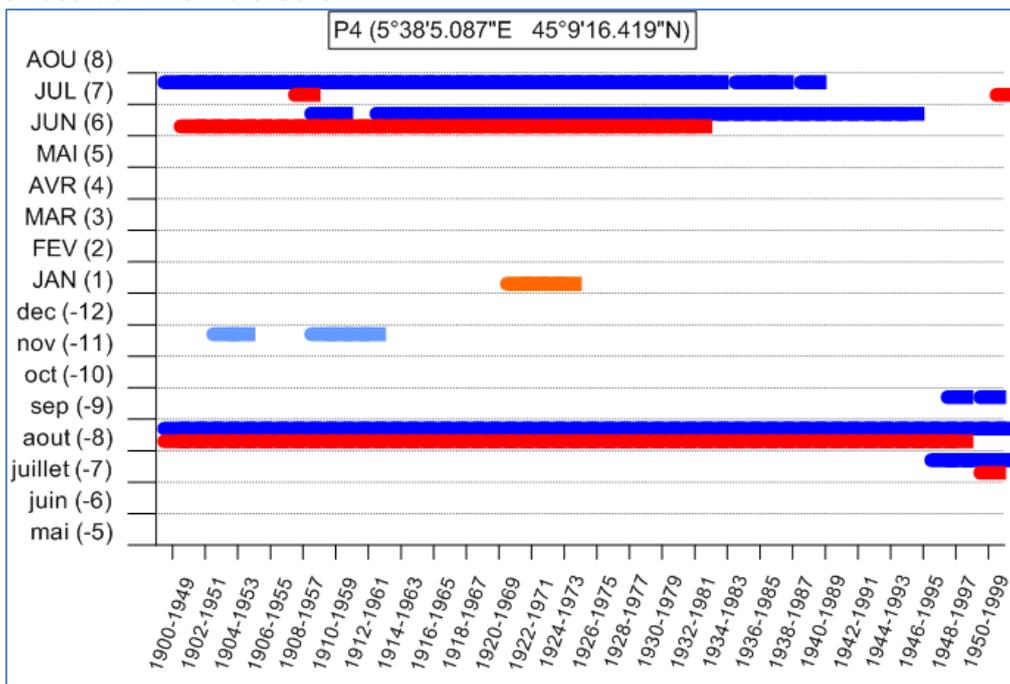
Pointer years and variability climatic: étude de la relation entre les années caractéristiques de chaque placette et deux paramètres climatiques, la température et les précipitations.

Les pointer years correspondent aux années n où 60% ou plus des cernes de la chronologie de cette année là ont une largeur inférieure à 25% au minimum par rapport à l'année n-1.

Les données climatiques sont issues d'Histalps. Pour chaque année caractéristique sont représentés les écarts à la moyenne (1961-1990) des températures et des précipitations mensuelles du mois de mai de l'année d'avant au mois d'août de l'année n.

L'échelle est de $P = 12T$ et les saisons sont délimitées par un code couleur pour les précipitations: pour l'année n-1 le printemps est en vert clair et l'été en orange. Pour l'année n l'automne est en marron, l'hiver en bleu, le printemps en vert foncé et l'été en rouge.

Annexe 4 : Evolution des régresseurs climatiques et de leurs influences au XXème siècle



1900-1925

La relation cerne-climat est principalement influencée par les conditions climatiques de l'été : les températures du mois d'août $n-1$ ainsi que celles de juin et de juillet de l'année n comportent une relation négative significative avec la croissance radiale. Les précipitations du mois d'août $n-1$, de juin et de juillet de l'année n ont une influence positive. Le mois de novembre ressort aussi pour les précipitations (corrélation négative).

1925-1950

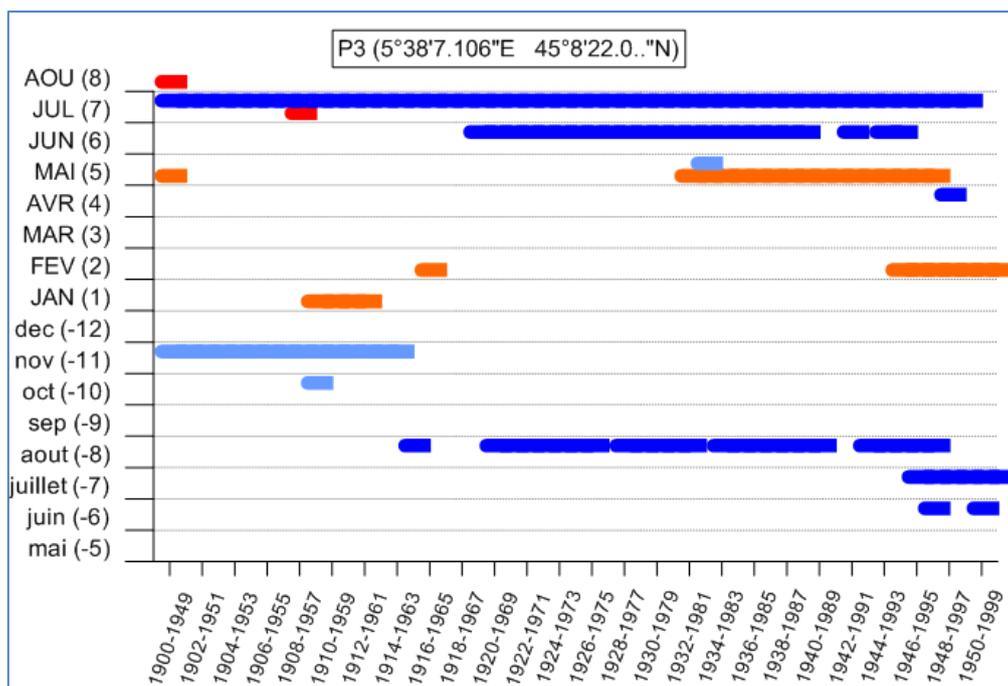
Les conditions climatiques estivales sont toujours importantes dans la relation cerne-climat, si ce n'est qu'il n'y a plus de relation entre la croissance des arbres et les températures de juillet de l'année n . L'influence des précipitations de novembre disparaît aussi, tandis qu'une relation se met en place avec les températures de janvier (corrélation positive).

1950-1975

L'influence des températures de janvier et de juin de l'année n disparaît progressivement. Celle des températures du mois d'août $n-1$ et les précipitations de juin n , juillet n et août $n-1$ gardent une relation.

1975-2000

La relation qu'il existe entre les précipitations estivales de l'année n et la croissance radiale s'arrête. Les conditions climatiques de l'année $n-1$ expliquent à elles seules la relation à la fin des années 1990. Une corrélation s'installe avec le mois de septembre et de juillet $n-1$ pour les précipitations, et juillet $n-1$ pour les températures.



1900-1925

La croissance radiale est principalement influencée par les précipitations de juillet de l'année n (corrélation positive) et de novembre de l'année $n-1$ (corrélation négative). Dans une moindre mesure, les températures de janvier, mai, juillet et août de l'année n , ainsi que les précipitations d'octobre jouent un rôle.

1925-1950

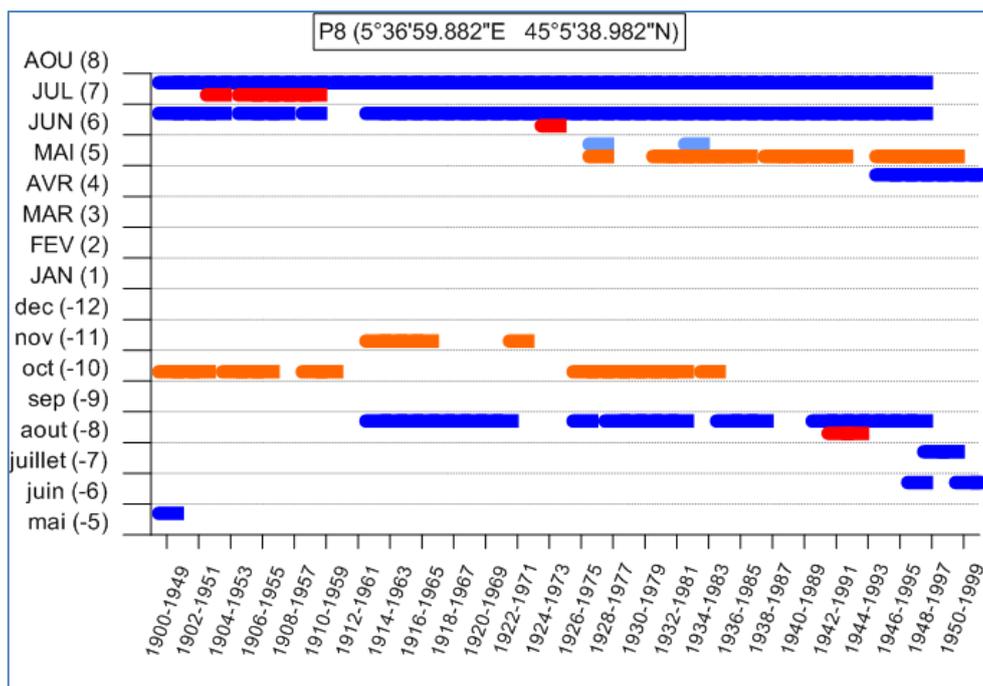
Les précipitations du mois d'août $n-1$ et de juin n apparaissent dans la relation. La corrélation positive des températures en janvier se décale en février. L'influence du mois de novembre disparaît.

1950-1975

Durant cette période, ce sont les précipitations estivales de l'année n et $n-1$ qui influencent le plus fortement les pins à crochets. Les températures et les précipitations de mai de l'année n ressortent aussi.

1975-2000

L'importance des précipitations estivales est toujours présente, mais perd de son intensité pour les mois d'août $n-1$ et de juin de l'année n . A la place, les précipitations de juin et de juillet ressortent. Une corrélation positive avec les températures de février est présente.



1900-1925

L'année n a plus d'influence que l'année $n-1$. On retrouve une corrélation positive avec les précipitations de juin et juillet de l'année n . Au tout début du siècle, le mois de mai $n-1$ ressort mais disparaît rapidement. Les températures d'octobre et de juillet influencent la croissance radiale (positivement pour octobre, négativement pour juillet).

1925-1950

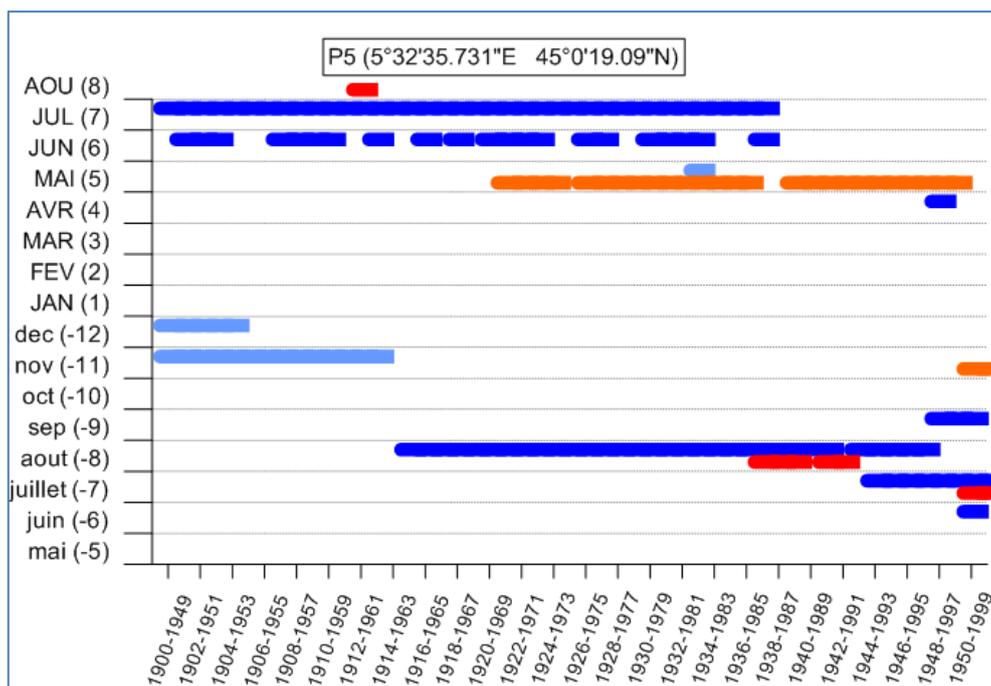
L'influence positive des températures d'octobre se déplace au mois de novembre. Alors que les températures de juillet n n'influencent plus la croissance, les précipitations d'août $n-1$ s'ajoutent aux précipitations estivales de l'année n .

1950-1975

On retrouve l'influence des étés (précipitations d'août $n-1$ et de juin, juillet de l'année n) et de l'automne (températures d'octobre positives). Les précipitations et les températures de mai n influencent positivement le peuplement.

1975-2000

Les précipitations d'août $n-1$, de juin et de juillet de l'année n perdent du poids dans la relation au bénéfice des précipitations de juin $n-1$, de juillet $n-1$ et d'avril. Les températures d'août de l'année $n-1$ ont un impact négatif sur la croissance radiale.



1900-1925

Seules les précipitations indiquent une relation. Cette dernière est concentrée sur les précipitations hivernales (novembre et décembre) qui sont un facteur limitant et les précipitations estivales de l'année n (juin et juillet) qui au contraire, influencent la pinède positivement.

1925-1950

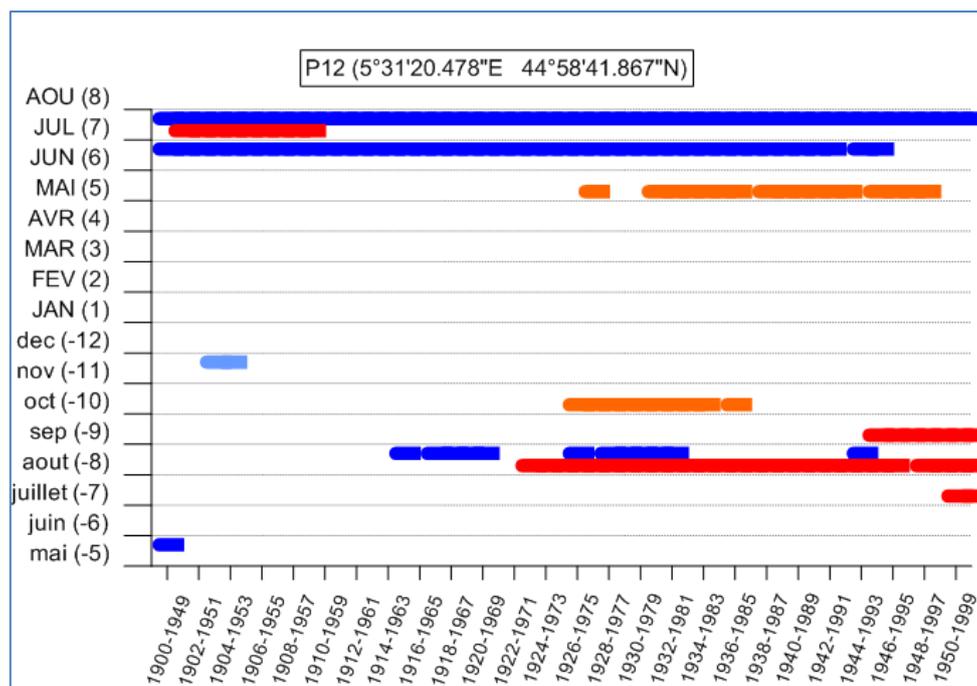
L'influence des précipitations hivernales disparaît. La chronologie se corrèle avec les précipitations du mois d'août de l'année $n-1$. Les températures, après avoir joué un rôle au début de la période en août n impactent positivement le peuplement durant le mois de mai de l'année n .

1950-1975

La situation est semblable à la période précédente si ce n'est que les précipitations de juin n perdent de l'importance et que durant quelques années les précipitations de mai n apparaissent (corrélations positives).

1975-2000

A la fin du XIX^{ème} siècle, le facteur le plus limitant (précipitations estivales de l'année n) disparaît. Les précipitations du mois de juin et de juillet de l'année $n-1$ prennent le relais avec toujours la présence des précipitations d'août $n-1$. Les températures qui jusque-là jouaient un rôle limité dans la croissance des arbres, se corrèlent négativement durant les mois de juillet-août $n-1$ et positivement en mai de l'année n . Elles ont une influence positive durant le mois de novembre à la fin de la période.



1900-1925

Ce sont principalement les précipitations de juin juillet de l'année n qui impactent la croissance des arbres durant cette période. Les températures se corrént négativement en juillet n . Notons la présence d'une corrélation négative avec les précipitations de novembre, et positive avec celles de mai $n-1$.

1925-1950

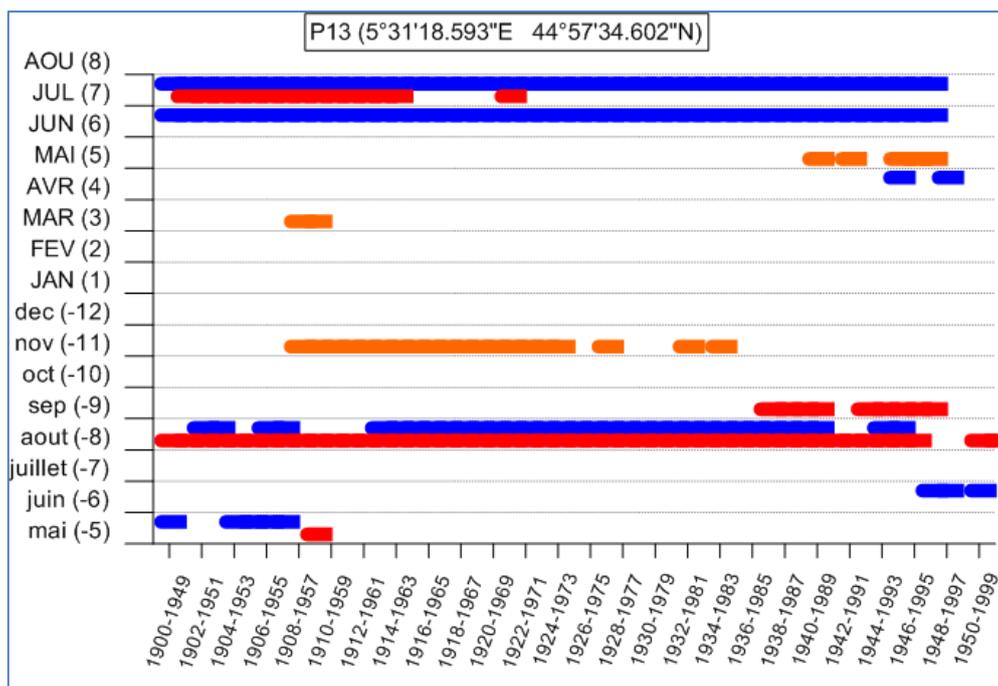
Seules les précipitations influencent la croissance radiale : en août $n-1$, en juin et en juillet de l'année n . Ces corrélations sont toutes les trois positives.

1950-1975

La variable température augmente son poids dans la relation cerne-climat. Les températures d'août $n-1$ sont corrélées négativement à la placette 12. Celles d'octobre et de mai (n) influencent positivement la croissance radiale. On retrouve les précipitations d'août $n-1$, de juin et de juillet de l'année n dans la relation.

1975-2000

Dans la continuité de la période précédente, la variable température explique de plus en plus les variations de croissance sur cette placette, en juillet, août, septembre $n-1$ et en mai de l'année n . L'influence des précipitations estivales de l'année n est toujours effective, mais moins pour le mois de juin.



1900-1925

Les mois d'août ressortent au niveau des températures et des précipitations. En mai, les précipitations jouent un rôle positif dans la relation et se font remplacé à la fin de cette période par les températures (corrélation négative). En novembre et en mars, les températures se corrèlent de manière positive. Les précipitations de juin de l'année n aussi.

1925-1950

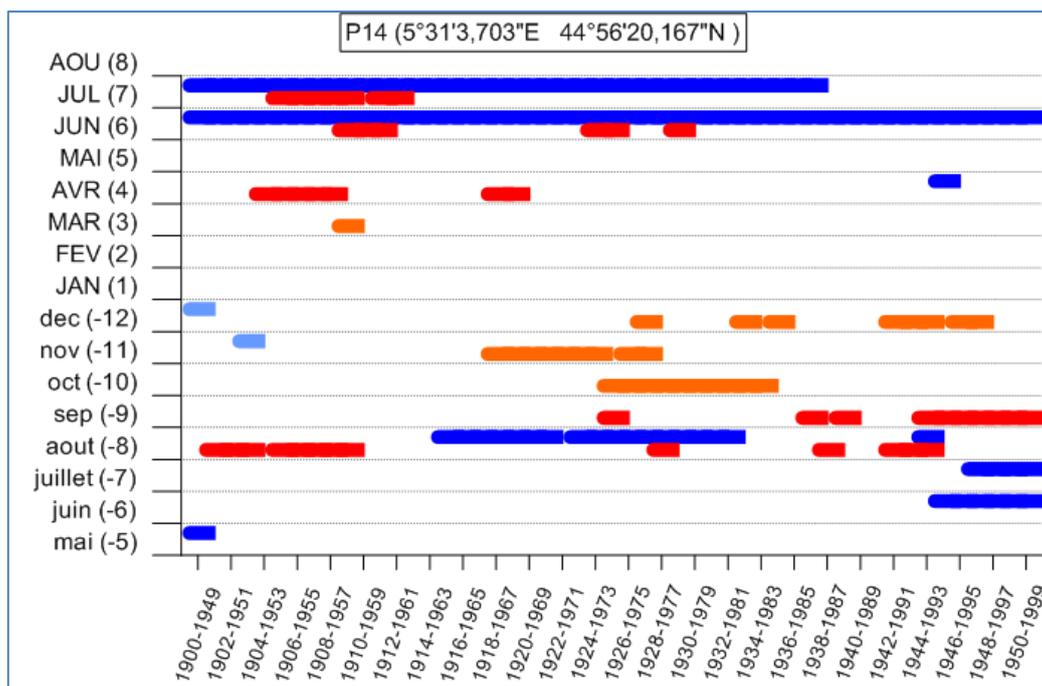
Alors que le mois de mai avait une influence sur la croissance radiale du peuplement dans la période précédente, il ne l'influence plus entre 1925 et 1950. L'importance des températures en juillet de l'année n disparaît peu à peu, contrairement à celle d'août $n-1$. Les précipitations d'août $n-1$, de juin et de juillet de l'année n ressortent toujours.

1950-1975

Durant l'année $n-1$, seuls les mois d'août (précipitations positives et températures négatives) et de novembre (températures positives) ressortent. Pendant l'année n , ce sont les précipitations de juin et de juillet qui se corrèlent positivement.

1975-2000

A la fin du XIXème, les précipitations estivales de l'année n ne se corrèlent plus avec la chronologie ; au même moment, une corrélation avec les précipitations de juin $n-1$ apparaît. Les températures se corrèlent négativement en août et en septembre $n-1$, et positivement en mai de l'année n en même temps que les précipitations d'avril (corrélation positive).



1900-1925

Le tout début du siècle est marqué par une occurrence du rôle des précipitations dans la relation (positivement pour mai $n-1$, juin et juillet n , négativement pour décembre). Le rôle des températures apparait ensuite, en août $n-1$, en avril, en juin et en juillet de l'année n , de manière négative. Les températures de mars influencent positivement le peuplement.

1925-1950

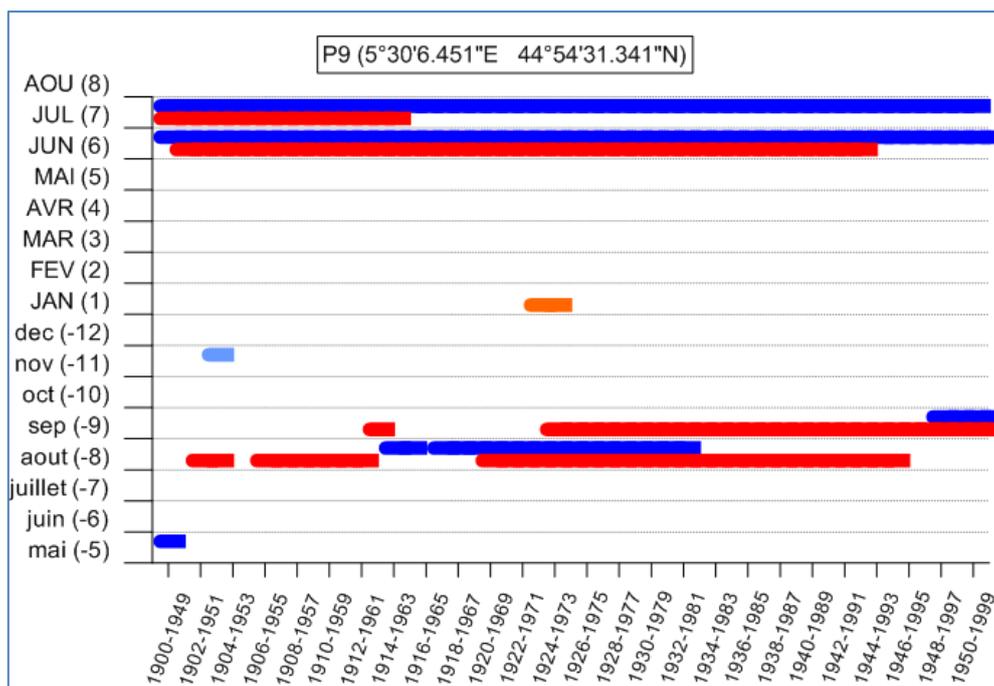
Les mois où les précipitations influencent la croissance radiale sont estivaux (les 2 mois d'août et le mois de juin de l'année n). Les températures agissent positivement en novembre, négativement en avril.

1950-1975

L'automne $n-1$ est fortement corrélé aux arbres de manière positive pour les températures. L'été, elles sont un frein à leur croissance. On retrouve l'influence bénéfique des précipitations en août $n-1$, juin et juillet de l'année n .

1975-2000

L'influence des précipitations des mois d'août disparaît. A la place, les mois de juin, juillet de l'année $n-1$ ressortent, tandis que les précipitations de juin n influencent toujours le peuplement. Les températures automnales sont moins importantes, en revanche les températures du mois d'août et du mois de septembre de l'année $n-1$ ressortent négativement.



1900-1925

Durant cette période, la croissance radiale du peuplement de la placette 9 est principalement expliquée par les précipitations et les températures de juin-juillet de l'année n . Les conditions climatiques de l'année $n-1$ jouent un rôle mineur, à l'exception des températures en août qui se corrèlent négativement.

1925-1950

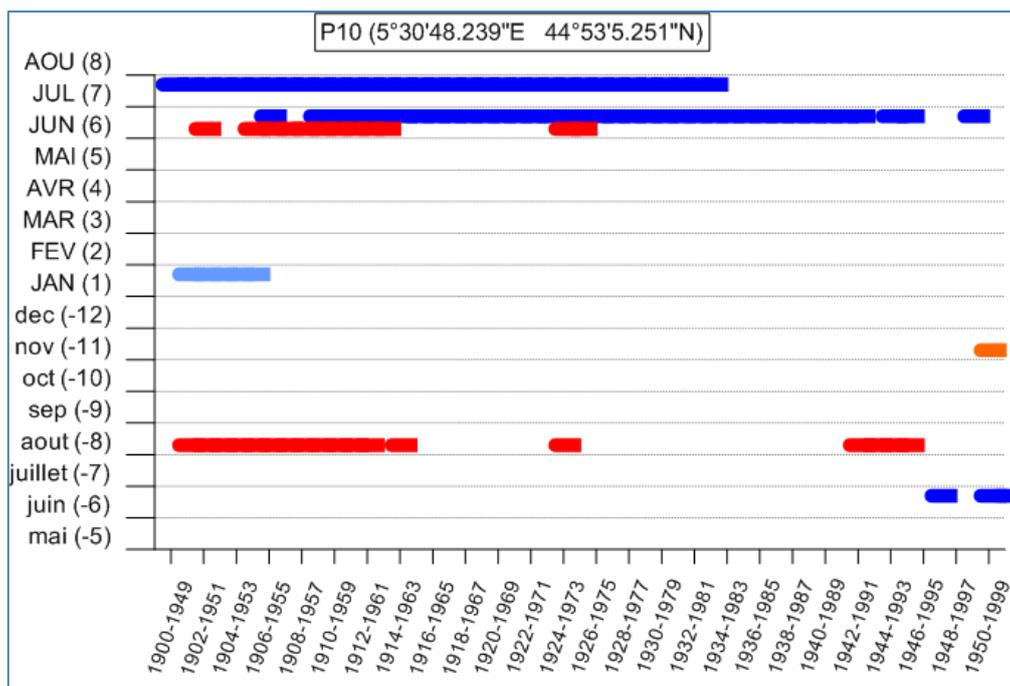
L'influence des températures de juillet n perd de son importance tandis que les précipitations du mois d'août $n-1$ agissent sur la croissance. Le reste est identique à la période précédente.

1950-1975

Durant l'année $n-1$, les mois d'août et de septembre ressortent, au niveau des températures et des précipitations pour août, et seulement des températures pour septembre. Les températures de janvier ont une influence positive sur quelques années. Durant l'été de l'année n , les précipitations ressortent toujours pour les mois de juin et de juillet, ainsi que les températures en juin.

1975-2000

Le rôle des températures est important dans la relation cerne-climat, et elles agissent en août $n-1$, septembre, et juin de l'année n . A la fin des années 1990, les précipitations de septembre jouent un rôle positif sur la croissance radiale, tandis que les précipitations de juin et de juillet de l'année n se corrèlent toujours positivement au peuplement.



1900-1925

Durant la première partie du XIX^{ème} siècle, les pins à crochets de la placette 10 sont influencés positivement par les précipitations de juin et de juillet de l'année n , et négativement par les températures du mois d'août $n-1$, de juin de l'année n , et par les précipitations du mois de janvier.

1925-1950

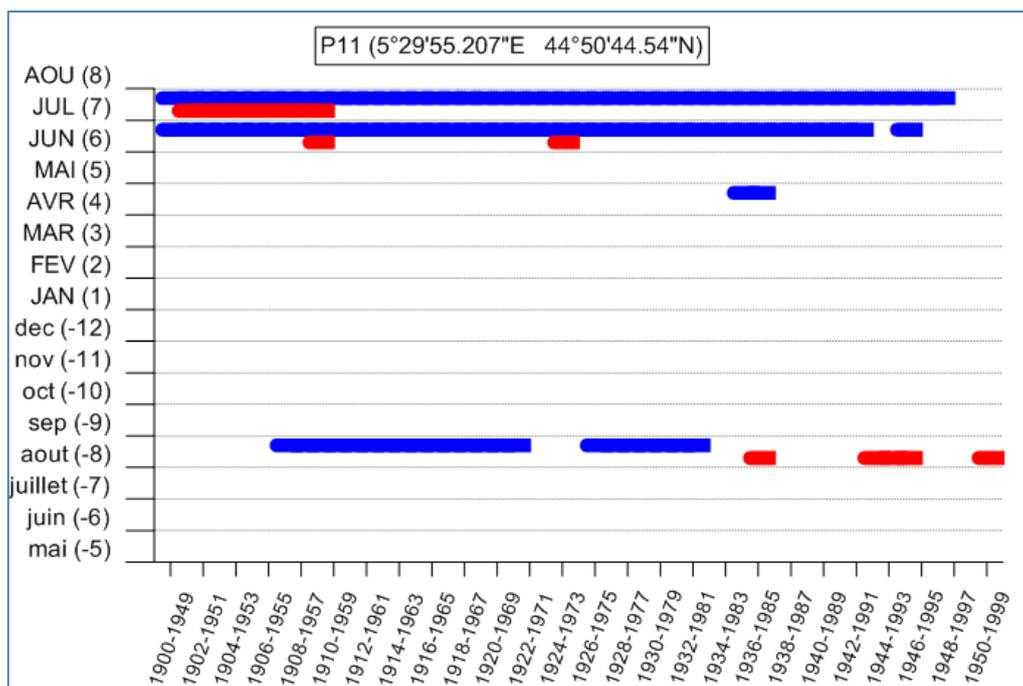
Le rôle des températures du mois d'août $n-1$ et de juin n disparaît, ainsi que l'influence négative des précipitations de janvier. Seules les précipitations estivales de l'année n jouent un rôle positif dans la croissance radiale.

1950-1975

Comme pour la période précédente, les précipitations des mois de juin et de juillet de l'année n expliquent le lien cerne-climat.

1975-2000

Les précipitations de juillet de l'année n ne se corrént plus aux données dendrochronologiques. Apparaît une relation positive avec les précipitations de juin $n-1$, ainsi qu'avec les températures du mois de novembre. Le mois d'août $n-1$ se corréle négativement pour les températures.



1900-1925

La relation cerne-climat est principalement expliquée par les précipitations de juin-juillet de l'année n , ainsi que par les températures de juillet n .

1925-1950

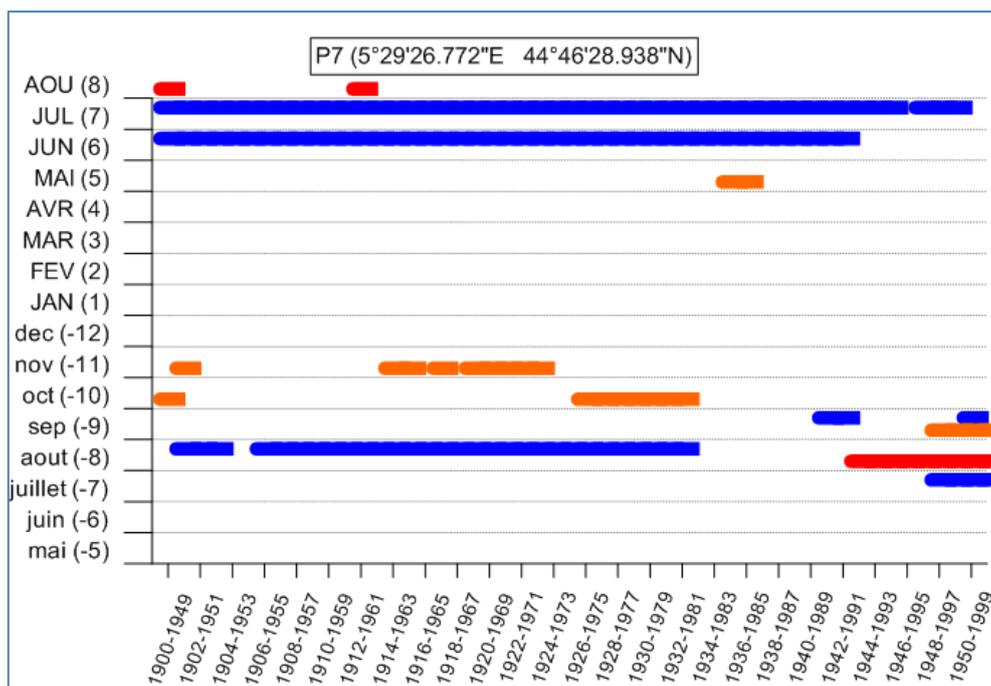
Durant cette période, les températures n'ont aucun impact sur la croissance radiale du peuplement. La relation se fait uniquement avec les précipitations du mois d'août $n-1$ et des mois juin-juillet de l'année n .

1950-1975

La situation est identique à la période précédente, si ce n'est que durant le mois d'août $n-1$, les températures remplacent les précipitations (et se corrént par contre négativement). Le mois d'avril joue légèrement un rôle positif au niveau des précipitations.

1975-2000

Le poids des précipitations estivales de l'année n s'atténue alors que celui des températures au mois d'août $n-1$ augmente. Sa corrélation est négative.



1900-1925

Les précipitations d'août de l'année $n-1$ et de juin-juillet de l'année n jouent un rôle positif durable à cette période. Les températures quant à elles, influencent la croissance radiale mais seulement les premières années, de manière positive en octobre et novembre, et négative en août de l'année n .

1925-1950

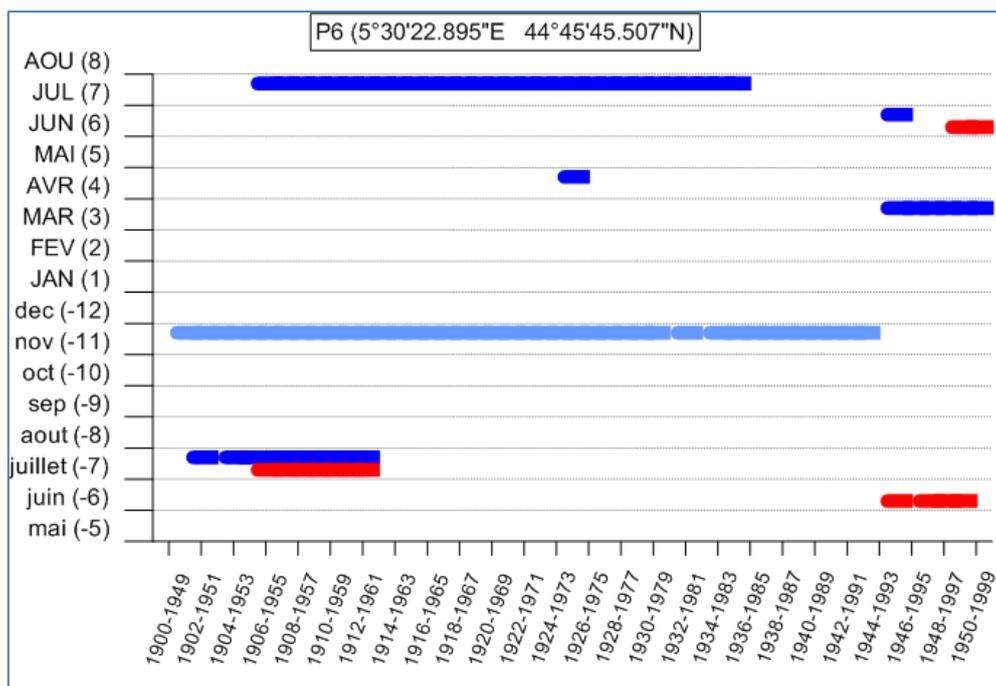
La situation est identique à la période précédente. On peut toutefois noter l'occurrence des températures de novembre qui agissent de manière positive.

1950-1975

L'influence positive des températures de novembre disparaît au profil des températures d'octobre. Le poids des précipitations du mois d'août de l'année $n-1$ s'atténue lui aussi, tandis que les précipitations de juin et de juillet de l'année n influencent toujours aussi fortement la croissance radiale. En mai, une corrélation positive avec les températures est observable.

1975-2000

La fin des années 1990 est marquée par une disparition progressive des corrélations entre la croissance de la pinède et les précipitations du mois de juin et du mois de juillet de l'année $n-1$. Apparaît une corrélation positive en juillet et en septembre de l'année $n-1$ avec les précipitations à la fin de cette période. Les températures du mois d'août $n-1$ agissent négativement, celles du mois de septembre positivement.



1900-1925

Au début du XIX^{ème} siècle, la croissance radiale du peuplement de la placette 6 est principalement expliquée par les précipitations du mois de novembre, avec une corrélation négative. Les précipitations des mois de juillet (corrélations positives) et les températures du mois de juillet (corrélation négative) influencent aussi la croissance.

1925-1950

Les précipitations de novembre et celles de juillet de l'année n sont les seules à se corrélérer (négativement pour novembre et positivement pour juillet) aux données dendrochronologiques entre 1925 et 1950.

1950-1975

La situation est similaire à la période précédente. Sur quelques années, les précipitations du mois d'avril se corrélerent aussi, positivement.

1975-2000

Le rôle des précipitations de juillet disparaît, celui des précipitations de novembre aussi. Ils sont remplacés par des corrélations négatives avec les températures des mois de juin, ainsi que par des corrélations positives avec les précipitations de mars et de juin de l'année n .

Annexe 5 : Illustrations photographiques de la campagne d'échantillonnage



©S. Labessoulhe