

Relation croissance radiale - climat chez le pin de Salzman (*Pinus nigra ssp. salzmannii*) dans le Sud de la France



Mémoire de fin d'études

ILLUSTRATION DE COUVERTURE : pins de Salzmann dans les gorges du Tarn. Photo : Daniel Cambon.

Relation croissance radiale - climat chez le
pin de Salzmann (*Pinus nigra* ssp. *salzmannii*)
dans le Sud de la France

Mémoire de fin d'études

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ELEVE DE LA FIF

| | |
|--|---|
| Formation des ingénieurs forestiers d'AgroParisTech-ENGREF | TRAVAUX D'ÉLÈVES |
| TITRE : Relation croissance radiale – climat chez le pin de Salzman (<i>Pinus nigra</i> ssp. <i>salzmannii</i>) dans le Sud de la France. | Mots clés : <i>Pinus nigra</i> Relation cerne-climat Dendroécologie |
| AUTEUR(S) : Thomas AMODEI | Promotion : 19 ^e |
| Caractéristiques : 100 pages ; 28 figures ; 5 tableaux ; 23 annexes ; bibliographie. | |

| | | |
|---|---|---------------------------------------|
| CADRE DU TRAVAIL | | |
| ORGANISME PILOTE OU CONTRACTANT : Institut national de la recherche agronomique, centre d'Avignon. | | |
| Nom des responsables : a) Frédéric GUIBAL, b) Bruno FADY | | |
| Fonction : a) Chargé de recherches CNRS (UMR 6116, CNRS) b) Directeur de recherches INRA (UR 629) | | |
| Nom du correspondant ENGREF (pour un stage long) : François LEBOURGEOIS | | |
| Tronc commun <input checked="" type="checkbox"/> Option <input type="checkbox"/> D. d'approfondissement <input type="checkbox"/> | Stage en entreprise <input type="checkbox"/> Stage à l'étranger <input type="checkbox"/> Stage fin d'études <input checked="" type="checkbox"/> Date de remise : | Autre <input type="checkbox"/> |
| Contrat avec Gref Services Nancy <input type="checkbox"/> OUI <input checked="" type="checkbox"/> NON | | |

| | |
|---|--|
| SUITE À DONNER (réservé au service des études) | |
| <input type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au / / , puis diffusable | |

Résumé

Le pin de Salzman, *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*, est une sous-espèce de pin noir endémique de l'Espagne et du Sud de la France. Son aire de distribution limitée en France fait des peuplements de pin de Salzman un habitat d'intérêt prioritaire au titre de la directive européenne 92/43/CEE (Natura 2000).

Dans cette étude, une approche dendroécologique est mise en œuvre afin de mieux comprendre la réponse du pin de Salzman aux variations du climat. La variabilité spatiale et temporelle de la réponse de la croissance radiale au climat est comparée d'une part, sur trois populations géographiquement éloignées (Conflent, gorges du Tarn et Saint-Guilhem-le-Désert) et d'autre part au sein d'un même peuplement (Saint-Guilhem-le-Désert) sur trois stations édaphiquement différentes.

Les pins de Salzman du Conflent présentent une sensibilité marquée au manque de précipitations durant la période de reprise de l'activité cambiale (mars à juin) alors que dans les gorges du Tarn et à Saint-Guilhem-le-Désert, les températures hivernales (février) et automnales de l'année précédente (octobre) sont corrélées respectivement positivement et négativement à la croissance radiale et expliquent plus de variance que les précipitations. Les pins poussant sur les stations les moins contraignantes édaphiquement présentent une sensibilité aux variables climatiques légèrement diminuée par rapport aux arbres des stations médiocres. Les résultats de cette étude suggèrent que le pin de Salzman est localement adapté ou présente une forte plasticité de sa croissance radiale lorsque les conditions environnementales changent.

Abstract

The Salzman pine, *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*, is an endemic black pine native to Spain and the South of France. Its restricted distribution in France makes its current populations a protected habitat under European Directive 92/43/EECC (Natura 2000).

In this study, a dendroecological approach was used to understand the impact of climate change on Salzman pine. On the one hand, the spatial and temporal variability of radial growth response was compared in three different populations (Conflent, Gorges du Tarn et Saint-Guilhem-le-Désert). On the other hand, within one population (Saint-Guilhem-le-Désert), the influence of soil composition on growth was assessed by comparing the variability of radial growth response on three plots under different soil and topographic conditions.

The Conflent population showed a strong sensitivity to spring precipitation deficits (March to June) whereas, at the "Gorges du Tarn" and Saint-Guilhem-le-Désert sites, the winter (February) and autumnal (October) temperatures explained more variance than precipitations and were respectively positively and negatively correlated to radial growth. On favourable soil types, pines appeared to be less sensitive to climate variation than on the less fertile ones. The results of this study suggest a potential important effect of local adaptation or plasticity in the response of the Salzman pine to climate variations.

Remerciements

Ce mémoire de fin d'études représente l'achèvement de quatre années de cursus d'ingénieur menées successivement à l'ENSTIB (École nationale supérieure des technologies et industries du bois) et l'ENGREF (École nationale du génie rural des eaux et des forêts). Cette formation quelque peu originale est d'une richesse formidable tant par la complémentarité des sujets abordés que par la qualité des enseignements. Je tiens à remercier très sincèrement toutes les personnes qui ont d'abord eu l'idée de proposer à des étudiants cette « passerelle » puis qui l'ont concrétisée.

Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans l'aide et le soutien d'un certain nombre de personnes. Mes plus sincères remerciements vont à Frédéric Guibal ainsi qu'à Bruno Fady qui ont été tout au long de ce stage un appui indispensable à mon travail et qui ont su recevoir toutes mes interrogations en me laissant une grande liberté dans mes choix. Merci à vous.

Je tiens à remercier également l'équipe de terrain de l'INRA d'Avignon, Norbert Turion, Olivier Gilg et Franck Rei, sans qui le matériel d'étude (les 800 carottes d'arbres) n'aurait simplement pas été disponible.

Au sein de l'IMEP qui a été mon lieu de travail pendant ces six mois, je remercie bien évidemment Frédéric Médail pour m'avoir accueilli dans ce laboratoire, ainsi que tous les étudiants, techniciens, chercheurs qui y travaillent et font de ces locaux un lieu riche de diversité où tant de disciplines sont représentées et se mêlent.

Mon attention se porte également vers mes voisines et voisins de bureaux que j'ai côtoyés chaque jour. Je remercie notamment, Élodie Brisset pour tout le temps passé à m'aider à « défricher » le fonctionnement de bon nombre de logiciels récalcitrants, Mélanie Saulnier, tant pour les conseils et suggestions en dendrochronologie que pour l'organisation de tous ces bons moments de partages participant à la bonne ambiance au laboratoire, Maryse Alvitre pour sa bonne humeur permanente, Cécile Miramont, Brigitte Talon, Beya Bachtibli, Clément Menbrives.

Enfin, je tiens à remercier également mes parents, ma sœur pour leur soutien constant ainsi qu'Élise, si loin et pourtant tellement présente dans mon esprit.

Table des matières

| | |
|--|---------------|
| Remerciements | - 1 - |
| Table des annexes | - 4 - |
| Table des illustrations | - 5 - |
| Index alphabétique des sigles, des abréviations et des symboles | - 7 - |
| Introduction | - 8 - |
| PARTIE I : Le pin de Salzman | - 9 - |
| <i>I. Quelques généralités</i> | - 9 - |
| I.1. Historique de la systématique | - 9 - |
| I.2. Aire de répartition | - 9 - |
| <i>II. Autécologie</i> | - 11 - |
| II.1. Exigences écologiques | - 11 - |
| II.1.1. Conditions édaphiques | - 11 - |
| II.1.2. Conditions topographiques et altitudinales | - 12 - |
| II.1.3. Conditions climatiques | - 13 - |
| II.1.4. Régénération | - 14 - |
| II.2. Les incendies | - 14 - |
| <i>III. Enjeux actuels</i> | - 15 - |
| II.3. Enjeux de protection | - 15 - |
| II.4. Risques potentiels d'hybridations avec d'autres pins noirs | - 15 - |
| II.5. Enjeux sylvicoles en zone méditerranéenne | - 15 - |
| <i>III. Contexte de l'étude</i> | - 16 - |
| III.1. Programme de conservation du pin de Salzman | - 16 - |
| III.2. Croissance radiale et sensibilité au climat du pin de Salzman en Espagne | - 17 - |
| III.2.1. Sensibilité aux variables climatiques | - 17 - |
| III.2.2. Tendances de la croissance radiale au cours du XX ^e siècle | - 17 - |
| III.2.3. Influence du substrat | - 18 - |
| III.3. Caractérisation génétique des pins de Salzman | - 18 - |
| PARTIE II : Réponse de la croissance radiale du pin de Salzman au climat : une approche dendroécologique. | - 21 - |
| <i>I. Matériel et méthode</i> | - 21 - |
| I.1. Les sites d'étude | - 21 - |
| I.1.1. Critères de sélection | - 21 - |
| I.1.2. Caractéristiques et historique des sites sélectionnés | - 22 - |
| I.2. Traitement des carottes | - 26 - |
| I.2.1. Le ponçage | - 26 - |
| I.2.2. L'interdatation et la mesure | - 27 - |
| I.2.3. La standardisation | - 27 - |
| I.2.4. Les années caractéristiques | - 27 - |
| I.3. Données climatiques | - 27 - |

| | |
|--|---------------|
| I.4. Calcul des fonctions de réponse | - 28 - |
| I.5. Analyses statistiques | - 29 - |
| I.5.1. Variance partagée entre populations | - 29 - |
| I.5.2. Variabilité des réponses individuelles | - 29 - |
| I.5.3. Analyse des données climatiques | - 29 - |
| II. Résultats sur les données climatiques | - 30 - |
| II.1. Confrontation des données Météo-France et Tyndall | - 30 - |
| II.2. Évolution du climat entre 1901 et 2002 | - 30 - |
| III. Résultats de l'étude inter-populations | - 31 - |
| III.1. Variabilité des patrons de croissance entre sites | - 31 - |
| III.2. Analyse en composantes principales sur les années caractéristiques | - 32 - |
| III.3. Réponse des pins de Salzman au climat | - 33 - |
| III.3.1. Fonctions de réponse sur l'ensemble de la chronologie | - 33 - |
| III.3.2. Variabilité des réponses individuelles | - 34 - |
| III.3.3. Fonction de réponse sur une fenêtre mobile | - 35 - |
| III.4. Signification des années caractéristiques | - 37 - |
| III.5. Discussion autour de la variabilité de réponse au climat entre les sites | - 40 - |
| III.5.1. Le Conflent | - 40 - |
| III.5.2. Saint-Guilhem-le-Désert et les gorges du Tarn | - 41 - |
| III.5.3. Synthèse intersites | - 42 - |
| IV. Résultats de l'étude intra-population | - 44 - |
| IV.1. Variabilité des schémas de croissance selon la station | - 44 - |
| IV.2. Réponse des pins de Salzman au climat | - 46 - |
| IV.2.1. Fonctions de réponse sur l'ensemble de la chronologie | - 46 - |
| IV.2.2. Variabilité des réponses individuelles | - 47 - |
| IV.2.3. Calcul des fonctions de réponse sur une fenêtre mobile | - 47 - |
| IV.3. Signification des années caractéristiques | - 49 - |
| IV.4. Discussion autour de l'influence de la station sur la réponse au climat | - 52 - |
| IV.4.1. Fond-de-Combe | - 52 - |
| IV.4.2. Ajouradou | - 52 - |
| IV.4.3. Synthèse intra-site | - 52 - |
| V. Discussion générale et perspectives | - 54 - |
| V.1. Méthodologie | - 54 - |
| V.2. La réponse au climat | - 54 - |
| V.3. Dépérissement | - 55 - |
| V.4. Plantations expérimentales | - 55 - |
| V.5. Gestion du pin de Salzman | - 56 - |
| Références bibliographiques | - 59 - |
| Liste des contacts | - 63 - |
| Table des annexes | - 65 - |

Table des annexes

| | |
|---|--------|
| Annexe 1 - Distribution des principaux peuplements de pin de Salzman en France | - 66 - |
| Annexe 2 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent (IGN) | - 67 - |
| Annexe 3 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent (BRGM) | - 68 - |
| Annexe 4 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique de Prades | - 69 - |
| Annexe 5 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent (Cassini) | - 70 - |
| Annexe 6 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn (IGN) | - 71 - |
| Annexe 7 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn (BRGM) | - 72 - |
| Annexe 8 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique de Florac | - 73 - |
| Annexe 9 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn (Cassini) | - 74 - |
| Annexe 10 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem (IGN) | - 75 - |
| Annexe 11 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem (BRGM) | - 76 - |
| Annexe 12 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique du Caylar | - 77 - |
| Annexe 13 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem (Cassini) | - 78 - |
| Annexe 14 - Détail des stations météorologiques utilisées sur les trois sites d'étude | - 79 - |
| Annexe 15 - Synthèse des tests de l'ANOVA et de Kruskal-Wallis pour les études intersites et intra-site | - 79 - |
| Annexe 16 - Chronologies standardisées sur les sites du Conflent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem-le-Désert et nombre de carottes analysées en fonction du temps | - 80 - |
| Annexe 17 - Chronologies standardisées sur les sites de Fond-de-Combe, de l'Ajouradou et du Roc-de-la-Jarre et nombre de carottes analysées en fonction du temps | - 81 - |
| Annexe 18 - Caractéristiques des arbres échantillonnés dans le Conflent (CO), les gorges du Tarn (GT), le Roc-de-la-Jarre (SGJ), l'Ajouradou (SGA), le Fond-de-Combe (SGF) | - 82 - |
| Annexe 19 - Résultat du calcul des fonctions de réponse pour l'étude intersites (a) et pour l'étude intra-site (b) utilisant comme régresseurs les températures minimales | - 84 - |
| Annexe 20 - Détail des indices de Cropper pour les années caractéristiques intersites a) et intra-site b) | - 85 - |
| Annexe 21 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre), des gorges du Tarn et du Conflent et anomalies de températures de janvier, février, mars (carrés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps | - 86 - |
| Annexe 22 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites du Roc-de-la-Jarre, de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe et anomalies de précipitations d'avril, mai, juin, juillet (triangles) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps | - 87 - |
| Annexe 23 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites du Roc-de-la-Jarre, de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe et anomalies de températures d'avril, mai, juillet (carrés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps | - 88 - |

Table des illustrations

Figures

| | |
|---|--------|
| Figure 1. Aire naturelle de distribution du pin noir et du pin de Salzmänn | - 10 - |
| Figure 2. Distribution du pin noir et du pin de Salzmänn en fonction de la latitude et de l'altitude dans son aire de distribution | - 12 - |
| Figure 3. Diagramme d'Emberger du pin noir et du pin de Salzmänn | - 13 - |
| Figure 4. Influence des variables climatiques mensuelles influençant la croissance radiale des pins de Salzmänn en Espagne | - 18 - |
| Figure 5. Arbre phylogénétique du pin noir | - 19 - |
| Figure 6. Carte de localisation des sites d'étude | - 22 - |
| Figure 7. Diagramme ombrothermique dans le Conflent | - 23 - |
| Figure 8. Diagramme ombrothermique dans les gorges du Tarn | - 24 - |
| Figure 9. Diagramme ombrothermique à Saint-Guilhem-le-Désert | - 26 - |
| Figure 10. Principales étapes d'une étude dendroécologique | - 29 - |
| Figure 11. Évolution des températures moyennes annuelles maximales et minimales entre 1901 et 2002 | - 30 - |
| Figure 12. Largeurs de cernes moyennes intersites | - 31 - |
| Figure 13. Analyse en composantes principales sur les années caractéristiques | - 33 - |
| Figure 14. Fonctions de réponse intersites | - 33 - |
| Figure 15. Proportion de variance expliquée par les variables climatiques (intersites) | - 34 - |
| Figure 16. Fonctions de réponse intersites sur une fenêtre mobile | - 36 - |
| Figure 17. Années caractéristiques intersites et anomalies climatiques de précipitations | - 38 - |
| Figure 18. Années caractéristiques intersites et anomalies climatiques de températures | - 39 - |
| Figure 19. Anomalies climatiques mensuelles en 1998 dans le Conflent | - 40 - |
| Figure 20. Fonction de réponse sur un intervalle mobile du mois de Juillet dans les gorges du Tarn | - 42 - |
| Figure 21. Évolution au cours du temps du coefficient de régression des températures de juillet et anomalies des températures maximales d'avril, mai, juin et juillet | - 43 - |
| Figure 22. Largeurs de cernes moyennes intra-site | - 45 - |
| Figure 23. Fonctions de réponse intra-site | - 46 - |
| Figure 24. Proportion de variance expliquée par les variables climatiques (intra-site) | - 47 - |
| Figure 25. Fonctions de réponse intra-site sur une fenêtre mobile | - 48 - |
| Figure 26. Années caractéristiques intra-site et anomalies de précipitations hivernales | - 50 - |
| Figure 27. Années caractéristiques intra-site et anomalies de températures hivernales | - 51 - |
| Figure 28. Anomalies climatiques mensuelles pour l'année 1912 dans l'Hérault | - 53 - |

Tableaux

| | |
|---|--------|
| Tableau 1. Principales sous-espèces de pins noirs | - 9 - |
| Tableau 2. Caractéristiques des sites d'études | - 22 - |
| Tableau 3. Chronologies disponibles pour chaque variable climatique | - 28 - |
| Tableau 4. Caractéristiques dendrochronologiques intersites | - 32 - |

Tableau 5. Caractéristiques dendrochronologiques intra-site.

- 46 -

Photos

Photo 1. Pins de Salzman poussant à Saint-Guilhem-le-Désert

- 13 -

Photo 2. Greffe d'un pin de Salzman en pépinière

- 16 -

Photo 3. Peuplement du Roc-de-la-Jarre

- 25 -

Photo 4. Sous-bois sur le site de l'Ajouradou

- 25 -

Index alphabétique des sigles, des abréviations et des symboles

AC : année caractéristique

ACP : analyse en composantes principales

ANOVA : analyse de la variance

AS : texture argilo-sableuse

CO : Conflent

CP : composante principale

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

FAO : *Food and agriculture organization* (Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation)

GT : gorges du Tarn

IGN : Institut géographique national

IMEP : Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie

INRA : Institut national de la recherche agronomique

IPCC : *Intergovernmental panel on climate change* (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)

MS : *mean sensitivity* (sensibilité moyenne)

ONF : Office national des forêts

P : précipitations

PCR : *polymerase chain reaction* (réaction de polymérisation en chaîne)

Q : quotient pluviothermique d'Emberger

R² : coefficient de détermination

RBD : réserve biologique domaniale dirigée

RTM : restauration des terrains en montagne

S : texture sableuse

SA : texture sablo-argileuse

SL : texture sablo-limoneuse

SGA : Saint-Guilhem-le-Désert, Ajouradou

SGF : Saint-Guilhem-le-Désert, Fond-de-Combe

SGJ : Saint-Guilhem-le-Désert, Roc-de-la-Jarre

TM : températures moyennes mensuelles

TN : températures moyennes mensuelles minimales

TX : températures moyennes mensuelles maximales

Introduction

Dans un contexte de changements globaux, la communauté scientifique et les gestionnaires du milieu naturel se posent un certain nombre de questions quant au devenir de la végétation actuellement en place. Les espèces présentent-elles une plasticité suffisante pour faire face à un climat changeant ? La rapidité du changement climatique laisse-t-elle la possibilité aux essences de s'adapter ? Des actions de gestion sont-elles envisageables pour accompagner au mieux ces changements ?

Le pin de Salzmann (*Pinus nigra* spp. *salzmannii*), sous-espèce de pin noir (*Pinus nigra* Arn.), est une essence naturellement présente sur le pourtour du bassin méditerranéen. Entre gestion conservatoire des peuplements français et volonté, peu à peu évoquée, de reboisement en zone méditerranéenne, les enjeux autour de cette essence sont doubles. Si le pin de Salzmann est largement représenté en Espagne, en France il n'est présent que sous forme de peuplements morcelés en limite supérieure de la zone méditerranéenne et sa surface très limitée fait des forêts de pin de Salzmann un habitat d'intérêt prioritaire au titre de la directive européenne 92/43 (Natura 2000). D'autre part, ce pin connaît un regain d'intérêt depuis une dizaine d'années chez les forestiers surtout parce que sa présence sur des stations a priori peu fertiles laisse supposer une grande rusticité et des capacités adaptatives à une grande variété de stations et de climats. Plusieurs études font date dans la description de cette espèce et des peuplements français (Calas 1900, Debazac 1963), mais seul un nombre limité de travaux se sont attachés à étudier son autécologie ou son comportement face au climat.

Les arbres sont de formidables marqueurs du temps et du climat en région tempérée. Aussi, l'étude des cernes d'accroissements annuels des arbres apparaît être un outil approprié et puissant pour évaluer la sensibilité d'une essence ligneuse au climat. C'est aux États-Unis, au début du XX^e siècle qu'Andrew E. Douglass pose les bases de la dendrochronologie (du grec *dendron* : arbre, *chronos* : temps et *logos* : science). La dendrochronologie repose sur l'analyse et la datation des cernes d'accroissements des arbres. Cette science se décline en plusieurs autres disciplines dont la dendroécologie qui consiste à utiliser les cernes d'accroissement des arbres pour étudier l'influence de différents facteurs écologiques (Kaennel et Schweingruber 1995).

Dans cette étude, une approche dendroécologique a été mise en œuvre dans le but d'apporter, d'une part, des éléments supplémentaires à la compréhension de la réponse dans la croissance radiale du pin de Salzmann au climat et, d'autre part, d'amener des éléments de réflexion quant à la gestion à venir des peuplements français.

Ce travail s'inscrit dans un vaste programme de valorisation et de conservation de cette espèce menée en partenariat par l'ONF et l'INRA Avignon depuis 2007. Cette collaboration a notamment abouti à une caractérisation génétique des peuplements français de pins de Salzmann (Fady *et al.* 2010).

Ce mémoire est construit en deux parties principales :

La première partie fait l'objet d'un tour d'horizon sur l'état des connaissances autour du pin de Salzmann, son aire de distribution, son autécologie, les enjeux actuels qui pèsent sur cette essence. Dans un second temps l'attention est portée sur le contexte dans lequel s'inscrit cette étude en détaillant le programme de conservation du pin de Salzmann, les études dendroécologiques menées en Espagne et la caractérisation génétique des populations de pins noirs.

La deuxième partie porte sur l'étude dendroécologique à proprement parler. Ce travail est en réalité composé de deux études : l'une qui consiste à comparer la réponse de la croissance radiale des pins de Salzmann au climat dans différents sites géographiquement éloignés, l'autre qui compare la relation croissance radiale-climat au sein d'un peuplement particulier et sur des stations différentes.

PARTIE I : Le pin de Salzman

I. Quelques généralités

I.1. Historique de la systématique

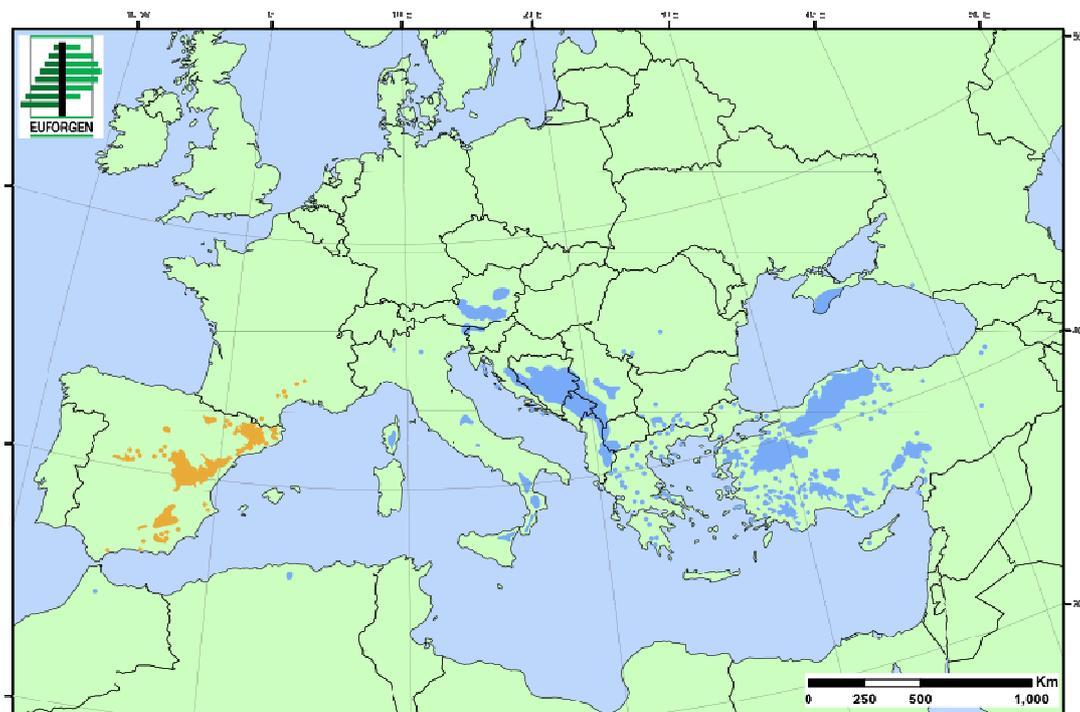
Le pin de Salzman (*Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco) a été décrit pour la première fois par le botaniste allemand Salzman dans la première moitié du XIX^e siècle en France à Saint-Guilhem-le-Désert (Calas 1900). Il fut dénommé de différentes manières au cours du temps à mesure que la connaissance et la description de cette espèce s'affinaient. Originellement nommé *Pinus monspeliensis* par Salzman au moment de sa découverte, il fut ensuite renommé *Pinus salzmanni* par Dunal en 1851 en l'honneur du botaniste (Debazac 1963). Quand Calas, au moment de l'exposition universelle de 1900 publie son rapport sur la restauration des terrains en montagne dans les Pyrénées-Orientales, il décrit le pin de Salzman comme une variété faisant partie de la sous-espèce des pins laricio (*Pinus laricio*). Ce n'est que plus tard qu'il fut classé parmi la sous-espèce *clusiana* variété *salzmannii*. Depuis 1964, il est finalement désigné sous le nom de *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco.

| Sous-espèces | Aire de distribution naturelle | Surface approximative (ha) |
|---|---|----------------------------|
| <i>Pinus nigra mauretana</i> | Algérie et Maroc | <10 |
| <i>Pinus nigra salzmannii</i> | Espagne, Sud de la France | 350 000 |
| <i>Pinus nigra laricio</i> (var. <i>corsicana</i> et var. <i>calabrica</i>) | Corse, Sicile et Calabre | 72 000 |
| <i>Pinus nigra nigra</i> | Italie, Nord de la Grèce, Alpes, Balkans | 800 000 |
| <i>Pinus nigra dalmatica</i> | Croatie | 1800 |
| <i>Pinus nigra pallasiana</i> | Grèce, Turquie, Chypre | 2,5.10 ⁶ |

Tableau 1. Principales sous-espèces de pins noirs et leurs aires naturelles de distribution. Source : Isajev *et al.* (2003) et Quézel et Médail (2003).

I.2. Aire de répartition

L'aire naturelle de répartition actuelle de l'espèce collective *Pinus nigra* Arn. dans son ensemble s'étend de l'Espagne à la Turquie sur une large frange de la moitié nord du bassin méditerranéen. On retrouve également quelques plus rares peuplements de pins noirs (*Pinus nigra mauretana*) dans le Nord algérien et marocain (Debazac 1971). En termes de surface, le pin noir couvre au total près de 3,5 millions d'hectares (Isajev *et al.* 2003) mais sa répartition est très éclatée.



■ *Pinus nigra* ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco

Figure 1. Aire naturelle de distribution du pin noir (bleu) et du pin de Salzmann (orange). Source : modifié du réseau Euforgen, 2009.

Cette distribution géographique ne serait, semble-t-il, que les restes d'une aire plus vaste qui n'a cessé de s'amenuiser depuis le Tertiaire (Alejano et Martinez-Montes 2006, Debazac 1963, 1971). Témoignage de la présence de pin noir pendant la période quaternaire, un certain nombre de macro-restes vieux de 110 000 ans ont été découverts dans l'Hérault par Vernet *et al.* (2005). Il semble que la succession de périodes glaciaires et interglaciaires durant le Quaternaire aient participé à la fragmentation de l'aire de distribution du pin noir (Delevoy 1949, Regato-Pajares *et al.* 1991). Cependant, lors d'une époque plus récente, les activités anthropiques ont plus que contribué à accentuer ce morcellement (Calas 1900). En raison de l'impossibilité de distinguer son pollen de celui du pin sylvestre, l'analyse pollinique ne peut malheureusement pas nous éclairer sur l'histoire passée du pin de Salzmann.

Le pin de Salzmann se cantonne dans la partie ouest du bassin méditerranéen. S'il est largement représenté en Espagne avec plus de 350 000 ha (Regato-Parajes et Escudero 1989), en France, il n'est présent que sous forme de peuplements très morcelés. Sans doute lié à cette répartition en petits peuplements épars, la connaissance de la surface occupée par le pin de Salzmann en France est encore relativement vague. Elle est actuellement estimée autour de 3 000 ha (Rameau *et al.* 2001). Cinq départements sont concernés par la présence de pin de Salzmann (annexe 1) :

- les Pyrénées-Orientales où il est présent sur le piémont du Canigou le long de la vallée du Têt entre Prades et Olette. Il semble spontané dans cette région (Calas 1900) bien que certaines parcelles aient fait l'objet de reboisement au cours de différents programmes de RTM au cours du XX^e siècle.
- l'Hérault : plusieurs peuplements y sont signalés dès la fin du XIX^e siècle à Carleucas (Debazac 1963) mais le plus célèbre reste celui de la forêt domaniale de Saint-Guilhem-le-Désert. Avec une surface en pin de Salzmann proche de 560 ha (Chakib 2009), ce dernier peuplement représente un des plus imposants massifs français d'un seul tenant.
- l'Ardèche : deux peuplements sont connus dans le Sud du département. Ces peuplements situés sur les communes de Banne et Malbosc sont les plus septentrionaux.
- le Gard : deux massifs de pin de Salzmann sont décrits dans le Gard. L'un est situé à la frontière avec l'Ardèche sur la commune de Gagnières, l'autre à 10 km

d'Alès au col d'Uglas. La station de Gagnières est décrite par Calas (1900) comme un massif important (environ un millier d'hectares). De récentes prospections ont cependant montré que ces stations sont aujourd'hui très réduites et que les vieux individus ont probablement été exploités au moment de l'activité minière intense dans la région jusque dans les années 1930 (Turion, *communication personnelle*).

- la Lozère : c'est probablement le dernier peuplement de pin de Salzman à avoir été découvert puisqu'il n'a été décrit par Déjean qu'en 1973. Cette découverte tardive est sans doute liée à la situation topographique particulière de ce peuplement. Les pins sont accrochés aux pentes et falaises des gorges du Tarn, au nord du causse Méjan.

II. Autécologie

Plusieurs études ont décrit de manière très détaillée les caractéristiques morphologiques et les critères diagnostiques permettant de distinguer le pin de Salzman des autres pins noirs (Calas 1900, Debazac 1963, Arbrez et Millier 1971, Tanghe 1991, Rameau *et al.* 2008, Lieutaghi 2004). L'objectif de ce paragraphe est de faire un point sur l'état des connaissances concernant les caractéristiques autécologiques de cette espèce et de synthétiser l'ensemble des facteurs écologiques affectant la régénération et le développement du pin de Salzman.

Deux points fondamentaux caractérisent l'écologie du pin de Salzman : il est, d'une part, décrit comme une essence pionnière ou post-pionnière présentant une capacité de régénération importante (ce point est cependant rediscuté en partie I, § II.1.4) et d'autre part, une espèce particulièrement longévive (en Espagne, des individus sont estimés âgés de plus de 900 ans et en France, l'âge des plus vieux individus est estimé à 450 ans) capable de maintenir une activité cambiale dans des conditions écologiques rudes (Regato-Pajares *et al.* 1991).

II.1. Exigences écologiques

Le pin de Salzman est une essence héliophile dans sa phase juvénile (Rameau *et al.* 2008) alors qu'il semble supporter relativement bien l'ombre au stade adulte (Quézel et Barbéro 1988). Il est régulièrement décrit comme une essence frugale (Calas 1900, Quézel et Barbéro 1988, Regato-Pajares *et al.* 1991) se contentant de stations médiocres délaissées par d'autres espèces méditerranéennes comme le chêne vert ou le chêne pubescent. Sur l'ensemble de l'aire de distribution du pin de Salzman, il pousse sur des sols et sous des conditions climatiques particulièrement variées. Comme beaucoup d'écologues l'ont déjà souligné, la variété des combinaisons entre types de sols et conditions climatiques sous lesquelles le pin de Salzman est capable de se développer et prospérer participe à la complexité de son autécologie.

II.1.1. Conditions édaphiques

Résumer les caractéristiques édaphiques des stations sur lesquelles on note la présence de pin de Salzman n'est pas de toute simplicité pour la simple raison qu'il s'accommode de sols extrêmement divers (Calas 1900, Debazac 1963, Quézel et Barbéro 1988). De manière générale, les stations de pin de Salzman présentent un caractère lithique très marqué avec la présence de roches affleurantes régulièrement évoquée (Regato-Pajares *et al.* 1991). Il est ainsi souvent décrit comme une essence à « tendance rupicole ».

En termes de substrats rocheux propices au développement du pin de Salzman il convient de distinguer les roches plutôt sédimentaires (calcaires dolomitiques et schistes) des roches cristallines (grès et moraines gneissiques). On retrouve fréquemment le pin de Salzman sur des sols calcaires poreux ou friables tels que les calcaires dolomitiques. Il se développe en revanche plus rarement sur les calcaires trop compacts. Les dolomies s'altèrent par dissolution chimique lente donnant des sols très fissurés parfois qualifiés de « ruiformes ». Cette morphologie géologique laisse la possibilité au système racinaire du pin de Salzman de s'insérer dans les fissures pour former un puissant réseau de racines dans la roche (Calas 1900). Les schistes, par érosion mécanique, s'altèrent en feuillets ou

plaquettes de dimensions variables dont l'érosion conduit à des sols présentant une fertilité plutôt favorable à la croissance en hauteur du pin de Salzman (Tanghe 1991). Finalement, les roches cristallines à base de grès ou de gneiss, également altérées par érosion mécanique, sont à l'origine de sols particulièrement sableux. Les substrats impliqués donnent généralement naissance à des sols drainants qui peuvent potentiellement vite s'assécher au cours de la période estivale (Quézel et Barbéro 1988). En lien étroit avec le type de substrat sur lequel le pin de Salzman pousse, le pH du sol est compris en moyenne entre 5 et 7,5.

II.1.2. Conditions topographiques et altitudinales

Dans une grande majorité des stations où il a été décrit en France et en Espagne, le pin de Salzman pousse sur des versants à pente assez marquée (en moyenne entre 20° et 40°). Dans les rares cas où il bénéficie de conditions locales particulières de bas de versant où les sols sont plus profonds, il peut atteindre des hauteurs proches de 30 m (Génova et Cancio 1999).

Le pin de Salzman présente une préférence notable pour l'étage supraméditerranéen voire montagnard méditerranéen (Gausson 1948, Quézel et Barbéro 1988, Regato-Pajares et Escudero 1989).

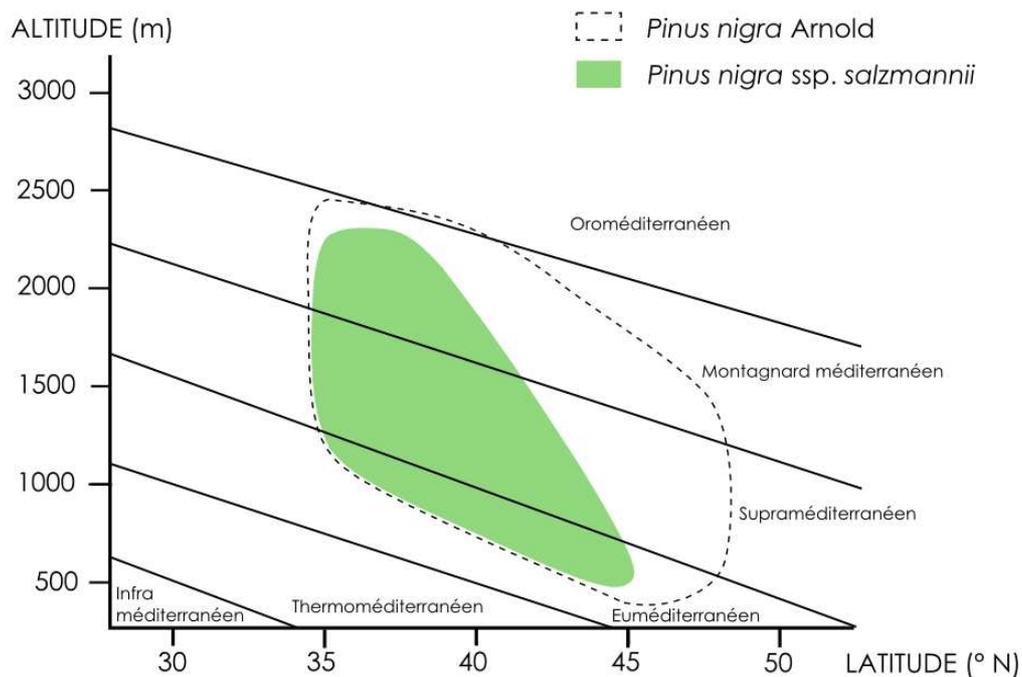


Figure 2. Diagramme présentant la situation du pin noir et du pin de Salzman en fonction de la latitude et de l'altitude dans son aire naturelle de distribution. Source : modifié de Regato-Pajares et Elena-Rossello 1995.



En France, le pin de Salzman pousse à des altitudes nettement plus basses que dans la péninsule ibérique. En effet, s'il n'est quasiment plus présent en plaine pour des raisons principalement liées à l'activité anthropique (Calas 1900), on le trouve en France le long d'un gradient altitudinal de 200 m (dans le Gard) à 950 m (dans les Pyrénées-Orientales). En Espagne, en revanche, il se cantonne à des altitudes plus élevées entre 1000 m et 1200 m dans les Pyrénées espagnoles (Rey 1954), autour de 1400 m au nord-est de Madrid (Génova et Martinez-Morillas 2002) et jusqu'à plus de 1800 m dans l'extrême Sud de l'Espagne dans la Sierra de Cazorla (Linares et Tiscar 2010).

Photo 1. Pins de Salzman poussant sur sol dolomitique à Saint-Guilhem-le-Désert.
Photo Thomas Amodei.

II.1.3. Conditions climatiques

Le climat méditerranéen se caractérise de manière générale par une sécheresse estivale, des pluies plutôt concentrées au cours des périodes automnales et hivernales et des températures estivales assez élevées. Les contraintes hydriques et thermiques pendant l'été y sont par conséquent fortes. Le pin de Salzman est une essence dite méditerranéenne mais sa distribution au sein des étages supraméditerranéens à montagnard méditerranéen dénote une affinité marquée pour les régions relativement bien arrosées avec un climat en moyenne frais et humide.

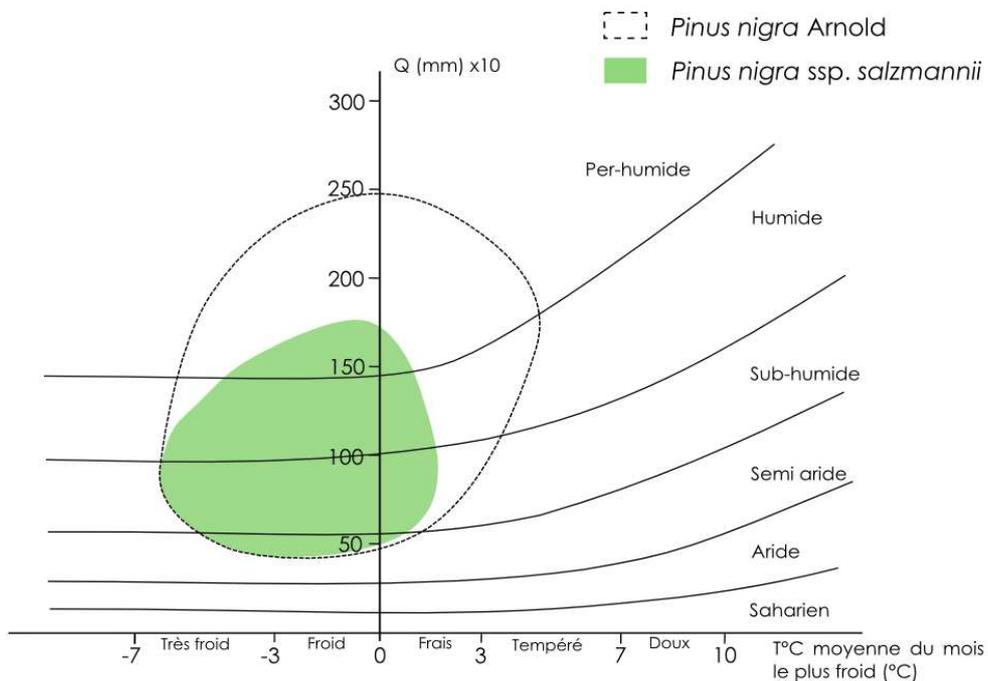


Figure 3. Diagramme d'Emberger présentant la répartition bioclimatique du pin noir et du pin de Salzman. Q : quotient pluviothermique d'Emberger, $Q = \frac{P}{0,5 \cdot (M + m) \cdot (M - m)}$ (P : précipitations annuelles en mm, M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en °C, m : moyenne des minima du mois le plus froid en °C). Source : modifié de Regato-Pajares et Elena-Rossello (1995) et Regato-Pajares *et al.* (1995).

À l'étage supraméditerranéen où il est le plus présent, le pin de Salzmann bénéficie de bioclimats humides ou subhumides avec des précipitations entre 700 et 1600 mm (Regato-Pajares *et al.* 1995). Les températures moyennes minimales des mois les plus froids (décembre, janvier et février) sont particulièrement basses et passent régulièrement sous 0 °C. À cet étage bioclimatique, les pins sont également soumis à une large amplitude thermique entre les températures de la période estivale et celles de la période hivernale.

À plus basse altitude, à l'étage euméditerranéen, le climat présente un caractère sec plus marqué, en particulier durant la période estivale. Les précipitations sont en moyenne moins abondantes et atteignent des moyennes annuelles voisines de 650 mm dans les stations centrales de l'Espagne (Génova et Martinez-Morillas 2002, Ordonez *et al.* 2004) ainsi que dans les Pyrénées-Orientales.

II.1.4. Régénération

Comme la majorité des autres pins, le pin de Salzmann est une espèce anémochore dont la distance de dispersion est néanmoins assez faible puisqu'elle est estimée à moins de 40 m (Ordonez *et al.* 2004). Sa fructification est très irrégulière d'une année à l'autre et la périodicité de forte production de graines est estimée entre 3 et 5 ans (Tiscar-Oliver 2007). Les cônes sont matures à la fin de l'automne suivant l'année de pollinisation et la dispersion des graines ne se produit pas avant l'hiver ou le printemps de l'année suivante.

Le pin de Salzmann se régénère bien sous son propre couvert (Ordonez *et al.* 2004) ou à la faveur de petites perturbations (Tiscar-Oliver et Ruiz, 2005). En effet, les taux de survie des semis sous une ambiance forestière sont significativement plus élevés qu'en pleine lumière (Ordonez *et al.* 2004, Tiscar-Oliver et Ruiz 2005). Ces résultats soulignent le besoin d'une humidité conséquente dans le sol au moment de la germination et du développement des semis de pin de Salzmann (Tiscar-Oliver 2007). D'autres facteurs abiotiques comme notamment les sécheresses estivales constituent un réel frein à la survie des semis (Tiscar-Oliver 2007, Tiscar-Oliver 2003). Parce qu'il se régénère mal sur un sol nu et que les semis ont plus de chance de survie sous un léger couvert, les résultats de plusieurs études espagnoles (Ordonez *et al.* 2004, Tiscar-Oliver et Ruiz 2005, Tiscar-Oliver 2003, 2007) remettent en cause le caractère pionnier (Regato-Pajares *et al.* 1991) souvent attribué au pin de Salzmann.

Les chercheurs espagnols soulignent le fait qu'une structure de peuplement plutôt irrégulière favorisée par des coupes légères et discontinues dans le temps semble être la plus favorable à la régénération et au maintien des peuplements de pin de Salzmann. Tiscar-Oliver et Ruiz (2005) préconisent ainsi une gestion des peuplements en futaie claire par bouquets avec par exemple des coupes par petites trouées n'excédant pas 1500 m² et des surfaces terrières maintenues autour de 10 m²/ha.

II.2. Les incendies

Les sécheresses estivales fréquentes en région méditerranéenne sont des facteurs prédisposant au déclenchement d'incendies. Bon nombre d'espèces méditerranéennes présentent d'ailleurs des comportements adaptatifs pour faire face à de telles perturbations : ce n'est pas le cas du pin de Salzmann (Ordonez *et al.* 2004).

Au cours de la deuxième moitié de l'Holocène, Vernet *et al.* (2005) souligne une probable augmentation de la rythmicité des incendies participant à la fragmentation des peuplements de pins noirs en France. Plus récemment, les feux de forêts ont causé d'importants dégâts dans les peuplements déjà réduits de pin de Salzmann. En Espagne, la part de forêt de pin de Salzmann décimée par les grands incendies de ces trente dernières années est estimée à 25 % de son aire de répartition (Ordonez *et al.* 2004). Cette diminution de la surface liée aux incendies vient du fait que le pin de Salzmann présente des difficultés à se régénérer après de telles perturbations (Calas 1900, Ordonez *et al.* 2004, Tiscar-Oliver et Ruiz 2005). Deux hypothèses sont apportées pour expliquer ce phénomène. D'une part, ce pin ne formant pas de cônes sérotineux, la proportion de graines viables après incendie est relativement faible. D'autre part, la faible ressource en eau sur les sols brûlés et la compétition avec d'autres espèces, herbacées, semblent jouer un rôle tout à fait néfaste dans la survie des semis de pin de Salzmann (Ordonez *et al.* 2004).

Curiosité entomologique

Le peuplement de pin de Salzman de Saint-Guilhem-le-Désert est très couru des entomologistes pour sa remarquable diversité et richesse en coléoptères (Schaefer 1952). Certains coléoptères semblent inféodés au pin de Salzman et quatre espèces (*Cryptocephalus Mayeti* Mars., *Cryptocephalus pini Guilhemi* Schaefer., *Chalcophora intermedia Fagniezi* Schaefer., *Trichodes flavocinctus dauci* Spin.) n'ont été décrites qu'à Saint-Guilhem-le-Désert et dans les Pyrénées-Orientales (Schaefer 1961). Les bois brûlés et la dynamique incendiaire importante au sein de ces peuplements constituent des facteurs idéaux au développement de cette entomofaune.

II. Enjeux actuels

II.3. Enjeux de protection

Si pendant longtemps le pin de Salzman a été considéré comme une essence forestière médiocre pour la production de bois d'œuvre, il a assez tôt fait l'objet de classement dans un but de protection. Dans bon nombre de réserves ou de parcs, c'est souvent son caractère de peuplement relique qui lui vaut ce statut. En France, dès 1933, quelques parcelles de la forêt domaniale de Saint-Guilhem-le-Désert ont bénéficié d'un statut de protection (Izard 1986, Chakib 2009). En Espagne, plusieurs milliers d'hectares de peuplements de pin de Salzman sont effectivement inclus dans des parcs naturels (parc naturel de Villas, parc naturel de l'Alto Tajo).

Avec la mise en application de la directive Habitats 92/43/EEC, la volonté de protéger des forêts à dominance de pin de Salzman a été confortée puisque les « Pinèdes (sub)méditerranéennes de pins noirs endémiques » (9530*) constituent des habitats d'intérêt prioritaire. Pour souligner la complexité et la variabilité des aspects phytosociologiques liés au pin de Salzman (Regato-Pajares et Escudero 1989, Regato-Parajes et Elena-Rossello 1995), ce sont, au total, cinq habitats dérivés du 9530* qui ont été décrits en France. Cela signifie que pratiquement dans chaque département français où il est présent, les peuplements de pin de Salzman ont donné lieu à un type d'habitat unique. Soulignons enfin que les peuplements de pin de Salzman de Saint-Guilhem présentent un intérêt entomologique (voir encadré ci-dessus).

II.4. Risques potentiels d'hybridations avec d'autres pins noirs

L'hypothèse d'un risque d'hybridation du pin de Salzman avec d'autres espèces de pin noir est depuis plusieurs années mentionné (Regato-Pajares *et al.* 1991, Isajev *et al.* 2003). Elle émane essentiellement des différences morphologiques observées entre les différents peuplements français ou espagnols. Ce point soulève quelques inquiétudes quant à la pérennité du *pool* de gènes propre au pin de Salzman. S'agissant d'une espèce peu présente en France, ce point est évoqué dans les cahiers d'habitats Natura 2000 comme une des menaces majeures pour l'espèce. Certains auteurs évoquent également la possibilité d'hybridation avec d'autres espèces de pins tel le pin sylvestre avec qui il cohabite depuis des milliers d'années (Regato-Pajares *et al.* 1991, Isajev *et al.* 2003). Cependant, il est à noter qu'à ce jour, aucune étude scientifique n'a encore conforté cette hypothèse.

Le risque d'hybridation du pin de Salzman est pris très au sérieux dans la gestion conservatoire actuelle de l'espèce puisqu'il est l'un des points initiateurs du programme de conservation du pin de Salzman français mis en place depuis 2007 (cf. partie I, § III.1).

II.5. Enjeux sylvicoles en zone méditerranéenne

Malgré le rapport ambitieux écrit par Calas au début du siècle faisant ressortir les potentialités importantes du pin de Salzman comme essence de reboisement en région méditerranéenne, les forestiers et la communauté scientifique ont considéré cette espèce plus comme une curiosité botanique que comme une espèce capable de fournir du bois d'œuvre.

Il faut néanmoins signaler l'existence de plusieurs peuplements de reboisement en pin de Salzman datant des travaux de restaurations des terrains en montagne (RTM) du début du XX^e siècle, notamment dans les Pyrénées-Orientales. De petites parcelles ont également fait l'objet de reboisements dans le Gard mais ces essais se sont avérés peu satisfaisants (Calas 1900). D'autre part, les quelques essais de plantations comparées réalisées dans les années 1970 entre les différentes espèces de pins noirs ont mis en évidence des performances moins bonnes du pin de Salzman (quelques provenance du Gard et de l'Hérault) en termes de croissance en hauteur par rapport aux autres sous-espèces de pin noir. Ces résultats expliquent en partie la préférence des forestiers pour des essences de reboisement telles que le pin laricio de Corse ou le pin noir d'Autriche.

Depuis les années 1990, le pin de Salzman connaît un regain d'intérêt chez les forestiers et les reboiseurs, en particulier pour sa rusticité et ses apparentes qualités d'adaptation à une large gamme de stations. Le contexte actuel de changement climatique ne fait qu'accentuer la nécessité, d'une part, de mettre en valeur des espèces endémiques capables de s'accommoder de conditions écologiques variées et, d'autre part, de mieux comprendre le rôle du climat dans la croissance, le développement et la distribution des essences méditerranéennes.

III. Contexte de l'étude

III.1. Programme de conservation du pin de Salzman

Cette étude dendroécologique s'inscrit dans un programme intitulé « Programme global de conservation des populations françaises de pin de Salzman » lancé par l'ONF depuis 2008. Ce travail se déroule en étroite collaboration avec l'INRA-Avignon pour tout ce qui touche aux aspects scientifiques. Les principaux objectifs de ce programme sont de :

- recenser et caractériser écologiquement les peuplements de pin de Salzman en France,
- mettre en place des plantations conservatoires et des vergers à graines à partir du clonage d'un grand nombre d'individus autochtones provenant des différentes populations françaises,
- faire une étude génétique pour évaluer la diversité des différentes populations françaises et apprécier le risque d'hybridation avec d'autres pins noirs.

Ce projet ambitieux dont le budget dépasse 500 k€ est en grande partie financé par l'État (DREAL Languedoc-Roussillon), l'ONF et quelques mécènes (Cambon 2009).

Après trois années de fonctionnement, ce programme se concrétise par d'importantes campagnes de prospections dans le Sud de la France, la récolte de près de 800 carottes d'arbres sur tous les sites de pin de Salzman en France, la récolte de greffons et de cônes de plus de 500 individus ainsi que leur greffage en pépinière. Le matériel pour mon étude dendroécologique est directement issu d'une sélection des carottages réalisés entre 2008 et 2010. Afin de s'assurer du caractère autochtone des individus clonés, la récolte de matériel végétal ne concerne que des pins de plus de 140 ans (Cambon 2009), c'est-à-dire déjà en place avant les premières grandes campagnes de reboisement RTM en France.



Photo 2. Greffe d'un pin de Salzman en pépinière. Photo Thomas Amodei.

III.2. Croissance radiale et sensibilité au climat du pin de Salzmann en Espagne

Un certain nombre d'études mettant en relation la croissance radiale du pin de Salzmann et le climat ont déjà été réalisées en Espagne depuis 1999. Les contextes écologique et climatique des peuplements étudiés en Espagne ne sont pas les mêmes qu'en France puisque les pins de Salzmann espagnols sont essentiellement présents à l'étage supraméditerranéen et montagnard méditerranéen et là où les mois de juillet et août sont particulièrement secs (FAO 1963). Néanmoins, ces travaux sont de précieux outils de comparaison et de discussion avec les résultats obtenus dans la présente étude. En effet, un certain nombre de résultats issus des travaux espagnols sont tout à fait complémentaires avec cette étude. Ce paragraphe détaille les principaux résultats issus de différentes publications dendroécologiques sur le pin de Salzmann.

III.2.1. Sensibilité aux variables climatiques

De façon assez générale, dans les diverses études liant la croissance radiale du pin de Salzmann espagnol et le climat, il ressort une sensibilité à la fois aux températures estivales (Linares et Tiscar 2010, Martin-Benito *et al.* 2010) et aux précipitations au cours des mois de juin et juillet (Génova et Cancio 1999, Andreu *et al.* 2007, Martin-Benito *et al.* 2010). La combinaison de ces deux facteurs semble faire du pin de Salzmann une essence potentiellement vulnérable aux sécheresses de début d'été. Les températures élevées de septembre et octobre semblent également responsables d'une croissance amoindrie lors de la formation du cerne de l'année suivante (Génova et Cancio, 1999, Andreu *et al.* 2007). Outre la période estivale, la saison hivernale apparaît comme une période charnière dans la croissance radiale du pin de Salzmann. La forte relation positive entre les températures de décembre ou février et la croissance radiale est souvent soulignée par les auteurs, en particulier sur les stations les plus arrosées (Génova et Cancio 1999, Génova et Martinez-Morillas 2002, Andreu *et al.* 2007, Linares et Tiscar 2010, Martin-Benito *et al.* 2010).

Peu d'études ont considéré l'évolution de la relation entre la croissance radiale et le climat au cours du temps chez les espèces de pins noirs. Il s'avère qu'à partir des années 1950, un certain nombre de variables climatiques apparaissent comme influençant significativement la croissance radiale ou bien prennent un caractère plus prononcé. Par exemple, Andreu *et al.* (2007) ont mis en évidence une influence déjà négative et accentuée dans la seconde moitié du XX^e siècle des températures estivales de l'année précédant la croissance sur le pin de Salzmann, le pin sylvestre et le pin à crochets.

III.2.2. Tendances de la croissance radiale au cours du XX^e siècle

Au cours du XX^e siècle, différentes tendances dans la croissance radiale sont soulignées. Ces différences semblent d'une part liées à la sensibilité vis-à-vis des conditions climatiques propre à chaque espèce et d'autre part à la latitude sous laquelle elles poussent. Ainsi, les pins méditerranéens présentent de manière générale une tendance de la croissance radiale plutôt en baisse dans les régions les plus chaudes (Martin-Benito *et al.* 2010). Les pins de Salzmann ne font pas exception à ces observations puisqu'en Espagne, ils présentent une tendance à la baisse de la croissance radiale d'autant plus marquée que les températures moyennes des régions sont élevées (Linares et Tiscar 2010, Martin-Benito *et al.* 2010). Cette diminution de l'accroissement est reliée à l'augmentation des températures et à l'augmentation de la fréquence d'apparition d'épisodes de sécheresse. Il apparaît, de plus que l'occurrence de cernes particulièrement minces chez le pin de Salzmann comme chez le pin sylvestre et le pin à crochets soit plus fréquente dans la deuxième moitié du XX^e siècle, en relation avec le réchauffement climatique enregistré (Andreu *et al.* 2007). La sensibilité aux sécheresses ne semble pas équivalente selon l'âge des pins de Salzmann (Linares et Tiscar 2010). Ainsi, les jeunes peuplements présentent, dans le Sud de l'Espagne, une diminution de la croissance radiale plus marquée que les peuplements plus âgés montrant une capacité adaptative plus élevée. Enfin, quelques rares populations montrent une tendance à la hausse de la croissance radiale (Andreu *et al.* 2007). Ces peuplements sont soumis à des conditions climatiques dans lesquelles les températures minimales représentent le facteur limitant leur croissance.

III.2.3. Influence du substrat

Un facteur peu pris en considération dans les études à large échelle est l'influence des conditions stationnelles sur la croissance radiale. Il semble en particulier que le type de substrat joue un rôle important dans la réponse des pins de Salzmann vis-à-vis du climat (Debazac 1971, Génova et Martinez-Morillas 2002). Génova et Martinez-Morillas (2002) ont mis en évidence, sous un mésoclimat identique, des différences notables dans la réponse radiale des pins aux variables précipitations et températures selon que les stations sont de type granitique ou dolomitique. Ainsi, sur les stations granitiques ou quartzitiques, présentant un pH acide, la sensibilité des pins de Salzmann aux précipitations printanières et estivales est très marquée (figure 4a). En revanche, les peuplements sur sols calcaires ou dolomitiques sont moins affectés par les variations de pluviosité mais montrent une sensibilité plus prononcée aux températures durant la saison hivernale (relation positive avec les températures de février) (figure 4b). Enfin, quel que soit le substrat, il semble que les années à cernes particulièrement minces coïncident avec des années présentant des températures printanières basses et un déficit hydrique estival important.

Ces résultats indiquent qu'il peut y avoir une variabilité locale importante de la réponse radiale des pins de Salzmann au climat selon le substrat et affinent un peu les études réalisées à grande échelle.

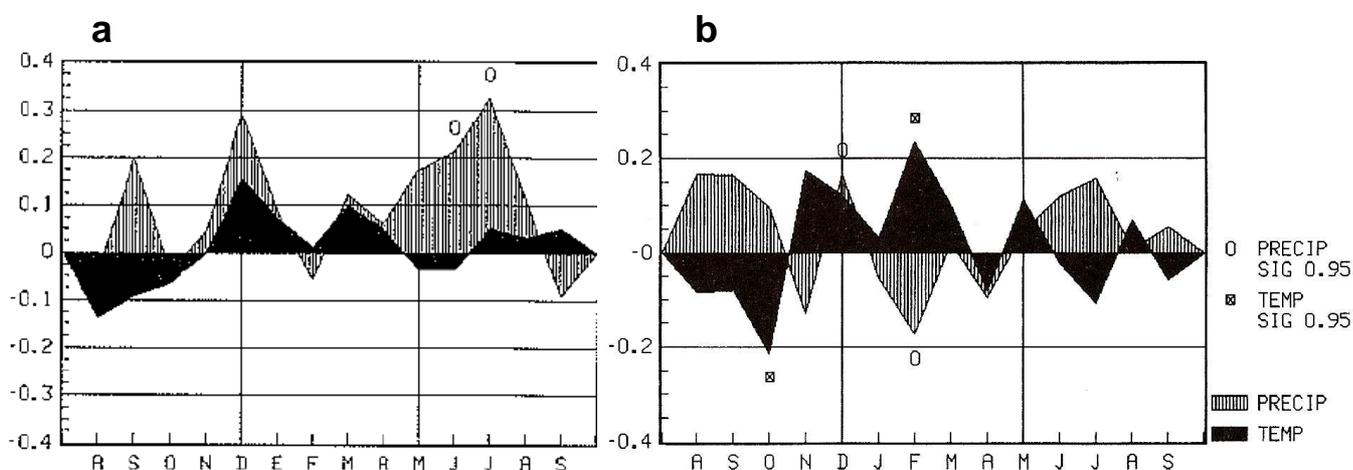


Figure 4. Importance de chaque variable climatique mensuelle influençant la croissance radiale des pins de Salzmann dans le centre de l'Espagne sur substrat quartzitique (a) et sur substrat dolomitique (b). L'axe des ordonnées présente le coefficient de régression issu du calcul des fonctions de réponse (cf. partie II § 1.4). PRECIP : précipitations. TEMP : températures moyennes. SIG 0,95 : significatif au seuil de 95%. Source : Génova et Cancio 1999, Génova et Martinez-Morillas 2002.

III.3. Caractérisation génétique des pins de Salzmann

La présente étude dendroécologique est directement liée au programme visant à caractériser et mesurer la diversité génétique et écologique des peuplements français de pin de Salzmann mené par l'INRA d'Avignon. C'est notamment sur la base des résultats de diversité et de différenciation génétiques que les populations de l'étude dendroécologique ont été sélectionnées. Il paraît alors important de détailler les premiers résultats issus de ce programme, d'autant que cette caractérisation génétique sert également de trame de fond à l'interprétation des résultats sur la relation entre la croissance radiale et le climat présentés dans la partie suivante (partie II).

Le principe utilisé pour caractériser génétiquement différentes populations de pin noir repose sur l'identification et la comparaison des fréquences de marqueurs moléculaires constituant des répétitions de paires de bases en tandem sur le génome, appelées microsatellites. Les études génétiques réalisées sur le pin de Salzmann utilisent 4 marqueurs microsatellites chloroplastiques (cpSSR) et 4 marqueurs microsatellites nucléaires (nSSR) (Jimenez *et al.* 2005, Fady *et al.* 2008, 2010). La méthodologie employée pour réaliser cette caractérisation consiste, dans un premier temps, à extraire l'ADN total de chaque individu à partir d'un échantillon d'aiguilles récoltées. Les microsatellites sont amplifiés par des amorces spécifiques au cours d'une réaction de polymérisation en chaîne (PCR) de l'ADN dans un thermocycleur. Combinés à des fluorochromes, la migration des

microsatellites sous l'effet d'un courant électrique sur une matrice de polyacrylamide est détectée par un faisceau laser qui stimule la réaction de fluorescence dans un analyseur génétique. La mesure de la diversité génétique intra-population et de la différenciation génétique inter-population passe par des calculs inspirés de l'analyse de la variance. Les microsatellites chloroplastiques et nucléaires sont de bons indicateurs de la distribution de la variabilité génétique et permettent de retracer l'historique démographique des populations et des espèces, comme par exemple : localiser leurs refuges glaciaires, comprendre les voies de recolonisation post-glaciaires ou identifier les populations à protéger en priorité dans une démarche de conservation (Fady, *communication personnelle*). Les microsatellites n'interviennent pas dans les mécanismes physiologiques ou de croissance radiale des arbres et ne renseignent donc pas directement sur les capacités d'adaptation des populations.

Les résultats résumés ci-dessous sont principalement issus d'une publication de Fady *et al.* (2010) complétés par plusieurs communications personnelles de Bruno Fady.

Au sein de l'espèce collective des pins noirs, le pin de Salzman et le pin laricio se distinguent génétiquement (Isajev *et al.* 2003). Deux grands groupes génétiques semblent se séparer chez les pins noirs, avec d'un côté les sous-espèces orientales (*Pinus nigra nigra*, *Pinus nigra pallasiana*) et de l'autre les sous-espèces occidentales (*Pinus nigra salzmannii*, *Pinus nigra laricio*, *Pinus nigra mauretana*).

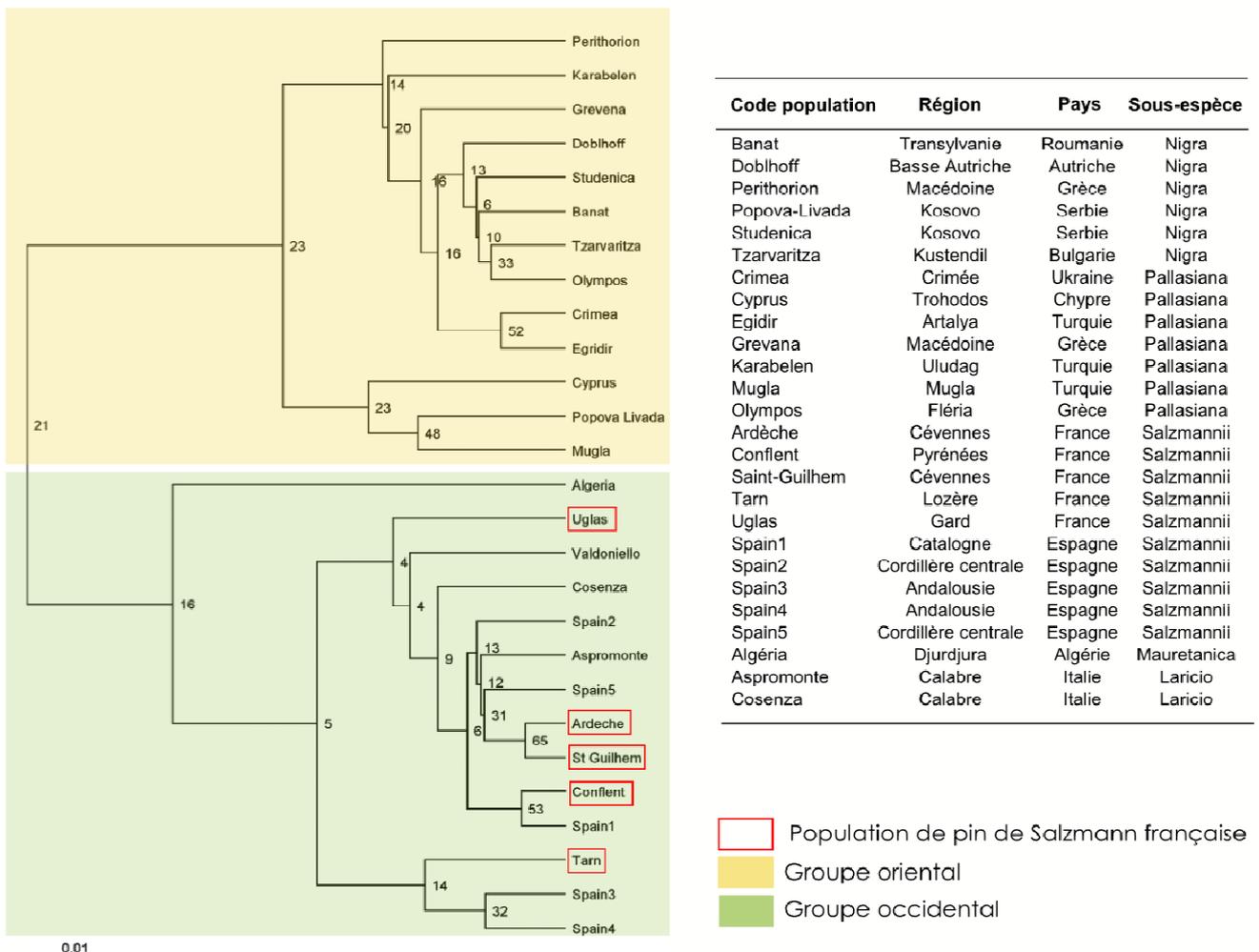


Figure 5. Arbre phylogénétique du pin noir et tableau récapitulatif des populations étudiées par Fady *et al.* (2010). Sur l'arbre phylogénétique, les nombres placés à chaque point de branchaison correspondent à une valeur de robustesse issue d'un test de permutation sur l'arbre phylogénétique (branchaison significative quand la valeur est supérieure à 50 %). Source : modifié de Fady *et al.* (2010).

La différenciation génétique du groupe de populations françaises et espagnoles de pins de Salzman n'est pas significative. En revanche, la différenciation génétique entre paires de populations est bien significative. Ce résultat soutient l'hypothèse d'une origine

commune entre les populations de pin de Salzman françaises et espagnoles ainsi que d'une probable différenciation génétique à la suite de la fragmentation progressive de son aire de distribution.

Entre les populations françaises de pin de Salzman, la différenciation génétique est faible mais significative, de l'ordre de 5 %. Les peuplements de Saint-Guilhem-le-Désert et d'Ardèche présentent la plus grande diversité haplotypique, un haplotype étant une combinaison individuelle des huit microsatellites étudiés. Les petites populations des gorges du Tarn (Lozère) et du col d'Uglas (Gard) montrent une plus faible diversité génétique mais présentent une forte originalité génétique comme l'atteste la présence de marqueurs diagnostics. Enfin, la population des Pyrénées-Orientales, si elle n'est pas très différente des populations des Cévennes, présente malgré tout un certain nombre d'haplotypes originaux qui pourraient permettre de la différencier des autres populations françaises et qui la rapprochent des populations catalanes.

De manière plus générale, la différenciation entre populations françaises de pin de Salzman est forte et du même ordre de grandeur que celle mesurée pour l'ensemble des populations de pins noirs dans le bassin méditerranéen. De la même façon, Jimenez *et al.* (2005) ont montré que les pins de Salzman présents dans le Sud-Est de l'Espagne présentaient autant de variabilité génétique au sein d'une population qu'entre les populations.

PARTIE II : Réponse de la croissance radiale du pin de Salzman au climat : une approche dendroécologique.

Dans ce travail, deux études complémentaires portant sur le comportement du pin de Salzman vis-à-vis du climat ont été menées en parallèle. Dans un premier temps, c'est la variabilité de la réponse radiale sous des climats différents qui a été étudiée sur des sites géographiquement éloignés. Pour cette étude, les sites ont été choisis sur la base des données génétiques tout en veillant à ce que les caractéristiques topographiques soient les plus homogènes possibles parmi le nombre restreint de peuplements de pin de Salzman distribués sur le territoire français. Cette étude est désignée plus loin comme l'« étude inter-sites ». Par ailleurs, a été testée, au sein d'un même peuplement et donc sous un mésoclimat identique, l'influence de paramètres directement liés aux conditions stationnelles de la réponse radiale des pins de Salzman au climat. Cette partie est nommée « étude intra-site ». Le but de ces deux études est de faire la part de l'influence d'éventuelles adaptations locales des pins au climat de celle liée aux conditions stationnelles.

I. Matériel et méthode

I.1. Les sites d'étude

I.1.1. Critères de sélection

Sur les sept peuplements français étudiés génétiquement par l'INRA Avignon, seuls trois ont été retenus. Dans la partie de l'étude visant à comparer la réponse au climat des pins de Salzman provenant de sites géographiquement éloignés, les sites ont été sélectionnés avec un souci d'homogénéité des paramètres tels que la texture du sol, l'exposition du versant, la position topographique des arbres ou encore la profondeur du sol. Les trois peuplements de pin de Salzman répondant au mieux à ces contraintes d'homogénéité se situent dans les Pyrénées-Orientales, dans les gorges du Tarn (Lozère) et dans la forêt domaniale de Saint-Guilhem-le-Désert (Hérault). Le choix de ces trois sites a également une justification génétique puisque le site de Saint-Guilhem-le-Désert est le site le plus diversifié génétiquement, la population des gorges du Tarn est la plus différenciée et la moins diverse génétiquement et enfin la population du Conflent est assez représentative des pins de Salzman pyrénéens et espagnols (partie I, § IV.3).

Au contraire, pour comprendre la part des variables non climatiques sur la croissance radiale sous mésoclimat identique, ont été privilégiés des sites de milieu de versant comparés à des sites de bas de versant ou à textures variables. C'est au sein de l'important massif de Saint-Guilhem-le-Désert que ces conditions ont pu être réunies.

| Code de site | ÉTUDE INTERSITES | | | ÉTUDE INTRA-SITE | | |
|------------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | CO | GT | SGJ | SGA | SGF | SGJ |
| Département | Pyrénées-Orientales | Lozère | Hérault | Hérault | Hérault | Hérault |
| Lieu | Conflent | Gorges du Tarn | Saint-Guilhem-le-Désert | Saint-Guilhem-le-Désert | Saint-Guilhem-le-Désert | Saint-Guilhem-le-Désert |
| Lieu-dit | Placette 61/66 | Roc-des-Hortous | Roc-de-la-Jarre | Ajouradou | Fond-de-Combe | Roc-de-la-Jarre |
| Latitude (N) | 42°33' | 44°17' | 43°46' | 43°47' | 43°46' | 43°46' |
| Longitude (W) | 2°20' | 3°17' | 3°33' | 3°34' | 3°33' | 3°33' |
| Altitude (m) | 710 - 784 | 683 - 798 | 587 - 635 | 427 - 537 | 483 - 529 | 587 - 635 |
| Pente (°) | 21 ± 1 | 42 ± 4 | 13 ± 6 | 23 ± 3 | 5 ± 2 | 13 ± 6 |
| Exposition | NO | N - NO | NO | N | - | NO |
| pH bio-indiqué | 5 - 5,5 | 7 - 7,5 | 7,5 - 8 | 7,5 - 8 | 7,5 - 8 | 7,5 - 8 |
| Texture | SL | SA | SL | AS | S | SL |
| Prof. moy. du sol (mm) | 300 | 200 | 400 | 400 | 500 | 400 |
| TX (°C) | 16,1 | 15,4 | 17,9 | 17,9 | 17,9 | 17,9 |
| TN (°C) | 6,2 | 4,4 | 7,4 | 7,4 | 7,4 | 7,4 |
| P annuelles (mm) | 646 | 1060 | 998 | 998 | 998 | 998 |

Tableau 2. Caractéristiques topographiques, pédologiques et climatiques des sites d'étude. TX : températures maximales. TN : températures minimales. P annuelles : cumul annuel des précipitations. Source : Amodei.

1.1.2. Caractéristiques et historique des sites sélectionnés

En plus d'une description stationnelle et climatique des sites, pour bien comprendre les patrons de croissance radiale des arbres échantillonnés et évaluer l'influence éventuelle des facteurs non écologiques, il est important de détailler l'historique des sites d'études. Les arbres sélectionnés ont été positionnés sur les cartes IGN au 1 : 25 000 (annexes 2, 6 et 10). À titre indicatif, les pins étudiés ont également été positionnés sur les cartes de Cassini, réalisées dans la deuxième moitié du XVIII^e siècle. Sur ces cartes, sont légendées les zones boisées au sein desquelles les massifs résineux et feuillus sont distingués. Ces cartes sont présentées en annexes 5, 9 et 13.

De manière générale, les peuplements choisis sont issus de futaies n'ayant pas subi d'exploitations depuis près d'une centaine d'années. Ce point sera détaillé dans les paragraphes qui suivent.

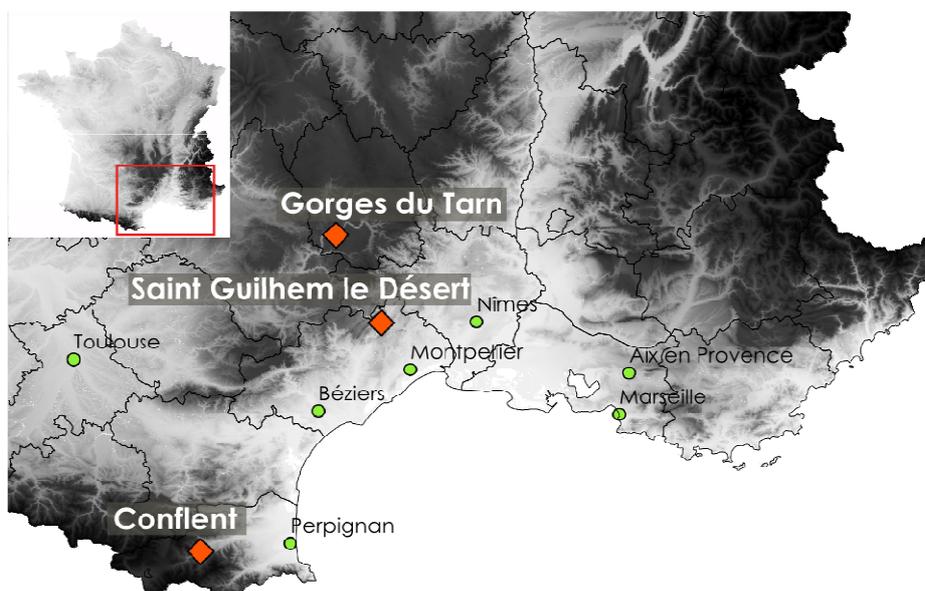


Figure 6. Carte de localisation des trois sites d'étude géographiquement éloignés. Source : Amodei. Source du fond de carte topographique : IGN.

Le Conflent

Dans les Pyrénées-Orientales, c'est à partir de Prades, en remontant l'étroite vallée du Têt, que les premiers peuplements de pin de Salzman apparaissent sur les contreforts du Canigou. Le site d'étude est situé dans la forêt domaniale du Conflent entre Escaro et Fuilla, dans le petit vallon enclavé de la Bailloubère.

Du point de vue géologique, cette Combe fait partie de la formation dite « d'Escaro » constituée d'une alternance de sables grossiers et de blocs de gneiss issus de l'érosion du massif du Canigou (Guitard *et al.* 1998). La texture du sol est à large dominance sableuse avec une légère fraction de limons par endroits. La profondeur du sol estimée à la tarière est en moyenne de 300 mm. Cependant, du fait de cette texture sableuse peu compacte, il est probable que la profondeur prospectable par les racines de pins soit tout de même plus importante. Situés sur une pente de 20°, les arbres carottés sont installés en exposition nord-ouest à des altitudes comprises entre 700 et 750 m.

Les arbres échantillonnés dans ce peuplement font partie d'une parcelle non exploitée depuis les reboisements RTM menés par Calas à la fin du XIX^e siècle. Les essences de reboisement de l'époque étaient essentiellement des pins de Salzman d'origine locale. Plus tard, dans les années 1960, le reste du peuplement a également fait l'objet de reboisements en pin de Salzman et pin laricio, avec des provenances semble-t-il plus hétérogènes avec notamment des plants ardéchois (Bernard Latour, *communication personnelle*). Les carottes ont été prélevées sur des arbres âgés de plus de 140 ans, antérieurs donc à la première phase de reboisement daté de 1899. À l'époque des premiers reboisements de Calas, il faut imaginer ce vallon et plus largement une bonne partie du Conflent comme de vastes versants au sol mis à nu. Les traces laissées par l'érosion des sols dans la région portent le nom très explicite de « griffes ». Pendant toute cette phase d'installation d'un couvert forestier depuis le reboisement, les parcelles en question ont été livrées à leur dynamique naturelle.

Les précipitations sont plutôt concentrées pendant la période printanière et automnale et les moyennes annuelles sont particulièrement basses puisqu'elles ne dépassent pas 650 mm (moyenne annuelle calculée sur la période 1961-1990). L'amplitude thermique entre les maxima et les minima, autour de 10 °C, est relativement constante au cours de l'année. Le mois le plus chaud de l'année est le mois de juillet où en moyenne les températures maximales atteignent les 25 °C. Les températures minimales atteignent les 6,2 °C en moyenne sur l'année.

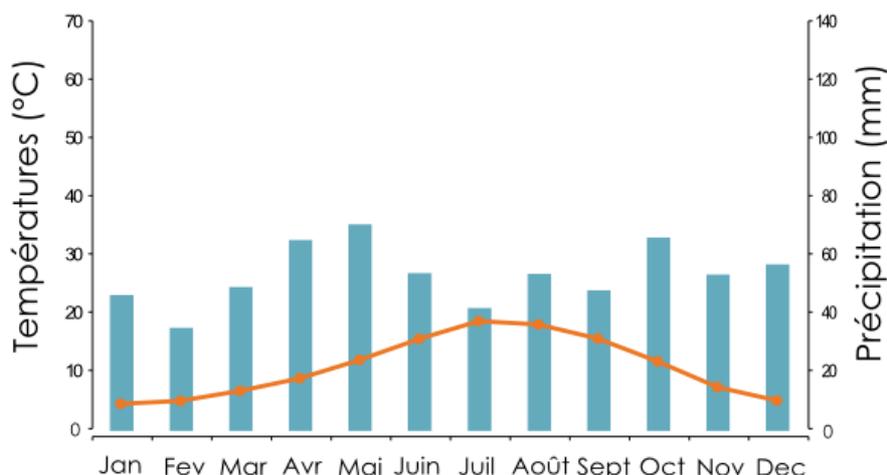


Figure 7. Diagramme ombrothermique construit pour la période 1961-1990 à partir des trois postes météorologiques les plus proches du site du Conflent. La température moyenne est représentée par la ligne et les précipitations moyennes mensuelles par les barres verticales. Source : Amodei et Météo-France.

Sur les stations des Pyrénées-Orientales, la diversité spécifique est assez faible et le sous-étage peu abondant. On retrouve principalement des essences arbustives caractéristiques de ce type d'habitat, à savoir des cistes à feuilles de lauriers (*Cistus*

laurifolius), de la callune (*Calluna vulgaris*), du genêt poilu (*Genista pilosa*). Le cortège floristique indique un pH à tendance largement acide.

Les gorges du Tarn

Dans le département de la Lozère, le site des gorges du Tarn se situe au nord du causse Méjean, en contrebas du lieu dit du Roc-des-Hortous. Les pins de Salzman poussent sur les pentes à 40° et falaises des gorges du Tarn exposées au nord. Une part importante du peuplement est située sur des terrains appartenant à la commune de la Malène (village localisé dans les gorges, à l'aplomb du site) mais, même dans ces escarpements, le découpage cadastral reste complexe et plusieurs bouquets de pin de Salzman poussent dans des parcelles privées.

Dans cette partie des gorges du Tarn, les escarpements se présentent comme une succession de couches calcaires plus ou moins dolomitisées. Les arbres, échantillonnés entre 700 et 800 m d'altitude, poussent sur un faciès mélangé de calcaire blanc massif et marno-calcaire en partie dolomitisé. La texture relevée est largement sableuse à sablo-argileuse par endroits. Du fait même de la conformation topographique du lieu, la proportion de roches affleurantes est très importante. La profondeur du sol est de ce fait extrêmement variable mais pour avoir un ordre d'idée, elle a été évaluée en moyenne autour de 200 à 250 mm. Il est probable que les pins profitent d'anfractuosités localisées pour étendre leur système racinaire en profondeur.

Ce peuplement de pin de Salzman décrit comme tel récemment (1973) bénéficie de peu d'archives forestières. Il semble néanmoins que du fait de sa situation particulièrement escarpée, ce peuplement a été plus parcouru pour des raisons scientifiques que pour des enjeux sylvicoles. Les incendies n'ont cependant pas épargné ce massif : l'un datant de 1949 (Cambon, *communication personnelle*), un autre de plus faible importance, dans les années 1960 (Quézel et Barbéro 1988). Avec près de 450 ans, c'est sur ce site que le plus vieux pin de Salzman français a été échantillonné.

Dans les gorges du Tarn, le climat, bien que décrit comme méditerranéen, profite des influences montagnardes du Massif central. Cela se traduit par des précipitations annuelles assez importantes avec 1050 mm en moyenne sur la période 1961-1990. Les températures moyennes maximales atteignent les 15,4 °C avec des maxima en juillet et août et des températures proches de 25,5 °C en moyenne. En hiver (décembre, janvier, février), les températures minimales passent régulièrement sous 0 °C. La station météo la plus proche de ce site (le Masegros) est située à 10 km, sur le causse de Sauveterre. Il est donc probable que vu la configuration des gorges et l'exposition nord-nord-ouest du site échantillonné, les températures minimales et les précipitations soient un peu sous-estimées.

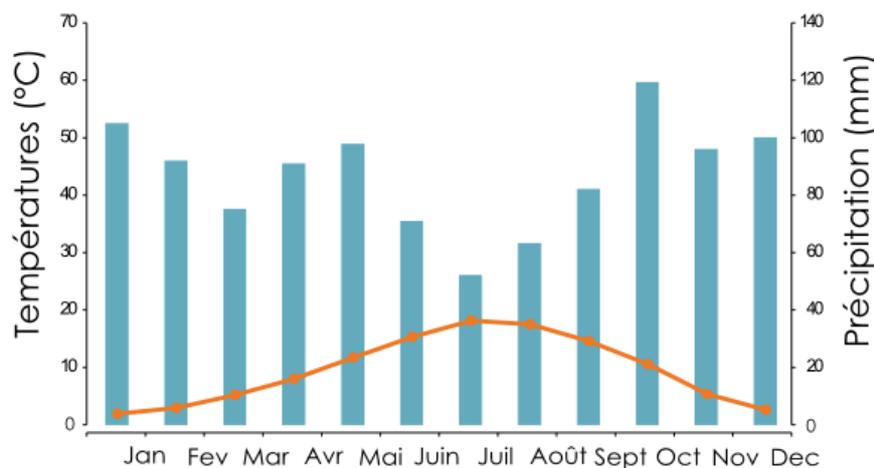


Figure 8. Diagramme ombrothermique construit pour la période 1961-1990 à partir des trois postes météorologiques les plus proches du site des gorges du Tarn. La température moyenne est représentée par la ligne et les précipitations moyennes mensuelles par les barres verticales. Source : Amodei et Météo-France.

Sur la station des gorges du Tarn, le cortège floristique est relativement varié. Le pin de Salzman est présent en mélange avec le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). On rencontre

en sous-étage une végétation plutôt neutrophile avec notamment du raisin d'ours (*Arctostaphylos uva-ursi*), de l'érable à feuille d'obier (*Acer opalus*) ou encore de l'alisier blanc (*Sorbus aria*).

Saint-Guilhem-le-Désert

Sans doute le plus étudié des peuplements de pin de Salzmann, il fait partie de la réserve biologique domaniale de Saint-Guilhem-le-Désert, à 5 km au nord du village du même nom dans le département de l'Hérault.

Le socle rocheux est constitué d'un ensemble dolomitique dit « ruiniforme ». Cette dolomie se décompose en sable dolomitique qui s'accumule dans les dépressions. Sur ce site aussi, les affleurements rocheux sont abondants.

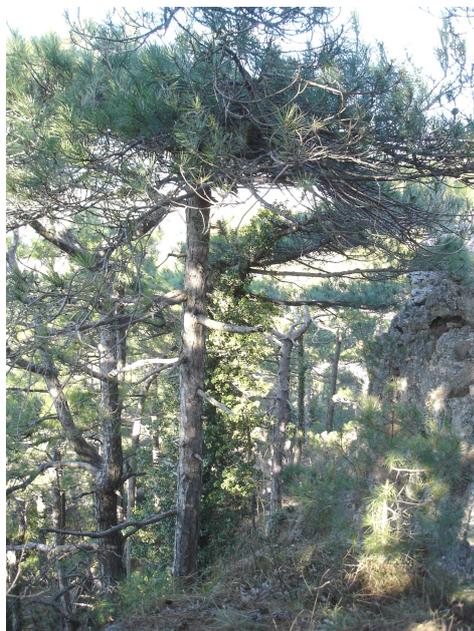


Photo 3. Peuplement de pin de Salzmann sur le site du Roc-de-la-Jarre. Photo Thomas Amodei.

Il convient de distinguer les trois sites échantillonnés à Saint-Guilhem.

Sur le site du Roc-de-la-Jarre, qui sert également de comparaison avec les sites de Lozère et des Pyrénées-Orientales, les arbres sont présents sur une pente d'environ 15° en exposition nord-ouest. Ils ont été échantillonnés le long d'une ligne de niveau autour de 600 m d'altitude. La texture est sableuse à sablo-limoneuse. La profondeur du sol est très hétérogène et n'excède jamais 400 mm de profondeur. La végétation accompagnatrice se compose principalement de la bruyère arborescente (*Erica arborea*), la filaire (*Filaria* sp.) ou encore le buis (*Buxus sempervirens*). La strate arbustive et herbacée est très limitée sur cette station.

Le site au nom explicite de Fond-de-Combe est situé en contrebas du Roc-de-la-Jarre à 500 m d'altitude. Ce site se distingue du précédent par une profondeur de sol plus importante, cette combe bénéficiant d'apports sédimentaires. Si la texture est toujours à dominance sableuse, la profondeur du sol dépasse 500 mm. Le cortège spécifique reste assez semblable au site du Roc-de-la-Jarre.



Enfin, le site de l'Ajouradou se situe à 1 km au nord des deux précédents sites d'étude (annexe 10). Les arbres exposés sur un versant nord-ouest bénéficient d'un sol nettement plus fertile dont la texture est plus proche d'un sol argilo-sableux que des textures strictement sableuses décrites précédemment. Le sous-bois y est d'ailleurs nettement plus fourni et varié en termes de diversité spécifique que sur les deux autres sites de Saint-Guilhem. On retrouve de façon nettement plus abondante des espèces telles que le chêne vert (*Quercus ilex*) ou encore le buis (*Buxus sempervirens*). Les pins atteignent en moyenne une hauteur proche de vingt mètres.

Photo 4. Sous-bois sur le site de l'Ajouradou. Photo Thomas Amodei.

Comme en témoignent les vestiges préhistoriques (dolmen de la Farigoule et menhir) ou l'abbaye de Gellone datée du IX^e siècle, le massif de Saint-Guilhem garde les marques d'une activité humaine ancienne. Historiquement, c'est surtout pour des raisons de difficulté d'accès que la forêt domaniale n'est pas exploitée par l'ONF depuis son acquisition par l'État en 1898. Le caractère original et relique de ce peuplement a cependant été souligné assez tôt puisque dès 1933, une vingtaine d'hectares ont fait l'objet d'une mise en réserve naturelle. Actuellement, et depuis 1993, le peuplement de la forêt domaniale de Saint-Guilhem bénéficie du statut de réserve biologique dirigée (RBD). Plusieurs incendies d'importances variables ont parcouru ce massif durant le XX^e siècle. Les deux plus destructeurs sont signalés en 1973 et 1984, brûlant respectivement 300 et 60 ha de forêt. Les parcelles effectivement touchées par ces incendies sont situées à environ 1,5 km au sud-ouest des sites échantillonnés.

Parmi les sites d'étude, celui de Saint-Guilhem-le-Désert est le plus chaud en termes de températures estivales avec notamment des températures maximales moyennes de juillet atteignant 28 °C. Les précipitations sont très déséquilibrées dans l'année : elles sont essentiellement concentrées durant la fin de l'automne et l'hiver (octobre, novembre, décembre et janvier) et faibles au cours des mois d'été (juin, juillet, août). En moyenne sur l'année, le cumul des précipitations atteint tout de même 1000 mm. Le mois de juillet apparaît sur le diagramme ombrothermique de Gaussen comme un mois sec ($P < 2 \times T$) (FAO 1963), ce qui fait du climat du site de Saint-Guilhem-le-Désert le seul qui soit réellement méditerranéen au sein de notre échantillon.

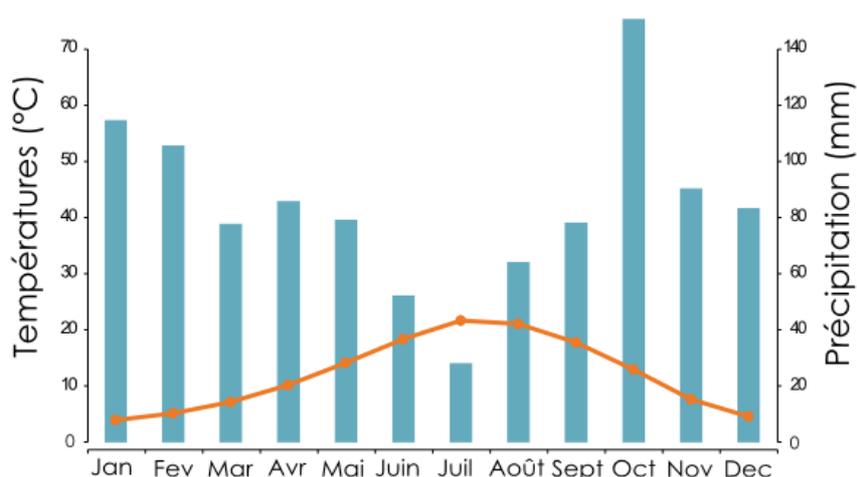


Figure 9. Diagramme ombrothermique construit pour la période 1966-1990 à partir des trois postes météorologiques les plus proches du site de Saint-Guilhem. La température moyenne est représentée par la ligne et les précipitations moyennes mensuelles par les barres verticales. Source : Amodei et Météo-France.

I.2. Traitement des carottes

Ce paragraphe reprend les principales étapes d'analyse des carottes et de traitements des données d'une étude dendrochronologique classique. La sélection du matériel d'étude a porté sur la lisibilité et la qualité des carottes avec comme objectif de constituer des lots de 20 carottes par site. Une carotte par arbre a été recueillie à 1,30 m à la tarière de Pressler. Les carottes trop fragmentées, présentant une pourriture marquée ou trop éloignée de la moelle ont été systématiquement écartées. Les 100 arbres sélectionnés ont tous plus de 140 ans (critère de choix pour l'étude génétique menée par l'INRA Avignon) et ont été prélevés parmi la strate dominante.

I.2.1. Le ponçage

Les carottes doivent être parfaitement « lisibles » sous une loupe binoculaire à un grossissement de 40. Pour ce faire, les carottes ont subi quatre cycles de ponçage avec successivement des papiers de grain de plus en plus fin (80, 180, 320, 400).

1.2.2. L'interdatation et la mesure

L'interdatation est une méthode qui consiste à retrouver, au sein d'un même site, des schémas de croissance communs d'une carotte à l'autre. Cette étape est essentielle pour permettre de dater chaque cerne avec certitude et déceler d'éventuels cernes absents et faux cernes (Fritts 1976).

Dans chacun des cinq sites d'étude, entre 19 et 21 carottes ont été sélectionnées et analysées. Les séries de largeur de cernes ont été mesurées à une précision de 0,01 mm sur un banc de mesure Lintab (Rinntech®). L'interdatation a été vérifiée à l'aide du logiciel COFECHA (Holmes 1983). Ce logiciel d'aide à la décision permet, entre autres, de calculer des corrélations sur des séquences de 10 années entre les largeurs de cernes de chaque individu mesuré et les largeurs de cernes de la chronologie moyenne du site.

1.2.3. La standardisation

La standardisation est un procédé mathématique qui consiste à atténuer le signal basse fréquence présent dans les cernes lié à un signal non climatique tel que l'âge des arbres, couramment appelé « effet âge » et l'effet géométrique lié à l'accroissement en diamètre du tronc. L'objectif de ce procédé est de faire ressortir la variabilité inter-annuelle liée aux variations climatiques (Cook et Kairiukstis 1990).

Pour ce faire, les chronologies mesurées ont été standardisées par une méthode de filtre passe-bas à l'aide du logiciel 3pBase (module *Calfit*) élaboré par Joël Guiot (Guiot et Gœury 1996). Différentes méthodes de standardisation sont couramment utilisées en dendrochronologie. Les méthodes dites de lissage, dont le filtre passe-bas fait partie, présentent l'avantage de mieux s'adapter aux différentes formes que peuvent prendre les séries chronologiques (Nicault *et al.* 2010). Cette méthode de filtre qui atténue les basses fréquences repose sur des transformations de Fourier (Nicault *et al.* 2010). La largeur de la fenêtre pour le lissage a été fixée à 10 ans pour obtenir une fonction ajustée à l'allure générale de chaque chronologie mesurée. Chaque largeur mesurée a ensuite été rapportée à la valeur correspondante de la courbe d'ajustement pour acquérir une valeur standardisée (indice). Au final, les fluctuations de longueur d'onde supérieure à 10 années sont éliminées et les variations interannuelles ressortent de manière très prononcée. La moyenne des indices est centrée autour de la valeur 1 et leur écart type est constant au cours du temps.

1.2.4. Les années caractéristiques

Sont appelées années caractéristiques, les années pour lesquelles une majorité d'arbres ont répondu de manière remarquable, en termes de croissance radiale, à une modification brutale de leur environnement. Une année caractéristique est dite « négative » si la croissance est particulièrement réduite par rapport aux autres années et, inversement, « positive » si la croissance a été exceptionnellement favorable. Il existe différentes manières de choisir le seuil à partir duquel une année est considérée comme caractéristique. Dans cette étude, c'est la définition de l'indice C_i de Cropper (1979) qui a été utilisée (l'indice i symbolisant l'année). Cette méthode consiste à calculer la largeur de cerne pour une année t ramenée à la largeur moyenne des cernes à l'intérieur d'une fenêtre de 13 années centrée sur l'année considérée. Ce rapport est ensuite normalisé en lui soustrayant la moyenne puis en divisant par l'écart type. Selon l'intensité de l'anomalie, trois classes sont distinguées : faible quand plus de 30 % des arbres présentent un indice $|C_i| > 1$, forte quand plus de 40 % des arbres présentent un indice $|C_i| > 1,28$ et extrême quand plus de 45 % des arbres présentent un indice $|C_i| > 1,645$ (Neuwirth *et al.* 2007).

L'étude des années de croissance caractéristiques permet de mieux comprendre la réponse des arbres à une brusque variation de leur environnement tels des événements climatiques extrêmes.

1.3. Données climatiques

Les variables climatiques ayant un effet potentiellement limitant sur la croissance radiale ont été choisies (Fritts 1976), à savoir (l'indice i symbolisant l'année):

- le cumul des précipitations mensuelles (P_i),
- la moyenne mensuelle des températures maximales (TX_i),

- la moyenne mensuelle des températures minimales (TN_i).

Ces trois variables climatiques sont issues de deux sources différentes. D'une part, les données enregistrées par les trois postes Météo-France les plus proches de chaque site ont été utilisées. Ces données présentent l'avantage de refléter au mieux les spécificités climatiques de chaque site d'étude. Cependant, bon nombre de postes météorologiques n'ont été mis en place qu'à partir de la seconde moitié du XX^e siècle et ne procurent bien souvent que des séries chronologiques modestes.

L'autre lot de variables climatiques (P_i , TX_i , TN_i) est issu du modèle spatialisé Tyndall (Mitchell *et al.* 2002) dont la résolution est de 0,5° (50 km). Ce modèle présente l'avantage de fournir des séries chronologiques homogènes de 1901 à 2002.

| | Series météorologiques | | | |
|-------------------------|------------------------|-----------|-------------|-----------|
| | Précipitations | | Tmax & Tmin | |
| | Tyndall | Stations | Tyndall | Stations |
| Conflent | 1901-2002 | 1876-2010 | 1901-2002 | 1947-2010 |
| gorges du Tarn | 1901-2002 | 1923-2010 | 1901-2002 | 1951-2010 |
| Saint-Guilhem-le-Désert | 1901-2002 | 1966-2010 | 1901-2002 | 1966-2010 |

Tableau 3. Chronologies disponibles pour chaque type de variables climatiques utilisées.
Source : Amodei.

Les données issues des postes Météo-France ont essentiellement servi à calibrer les données du modèle Tyndall.

Pour rechercher le lien entre les années caractéristiques (partie II, § 1.2.4) et les conditions climatiques des années correspondantes, les variables climatiques ont en fait été normalisées par rapport aux valeurs moyennes de la période 1961-1990. Ce calcul permet de faire ressortir les anomalies climatiques « chaudes » ou « sèches », selon qu'il s'agit des températures ou précipitations, quand le rapport est supérieur à σ et « froides » ou « humide » quand il est inférieur à σ , σ représentant l'écart type (Neuwirth *et al.* 2007).

1.4. Calcul des fonctions de réponse

Les fonctions de réponse définies par Fritts (1976) sont basées sur une méthode de régression multiple orthogonalisée (Kaennel et Schweingruber 1995). Les moyennes par site des indices de croissance sont utilisées comme variables dépendantes et les variables climatiques mensuelles comme régresseurs. Afin de mieux appréhender le cycle phénologique du pin de Salzmann, les variables climatiques d'octobre de l'année précédente (octobre $t-1$) à septembre de l'année en cours (septembre t) ont été utilisées. Le calcul des fonctions de réponse réalisé à partir de la chronologie moyenne standardisée par site permet de souligner la réponse d'une population au climat. Cependant, afin de mettre en évidence la variabilité de réponse inter-individuelle par site, les fonctions de réponse ont également été calculées pour chaque arbre d'un même site. Si le résultat par arbre n'est pas représentatif de la population, il permet d'apprécier l'importance de la variabilité de réponse des pins au sein d'un site par rapport à la variabilité totale sur l'ensemble des sites.

Les logiciels couramment utilisés pour ce calcul font appel à une méthode de *bootstrap* (tirage aléatoire avec remise répété un grand nombre de fois) permettant d'augmenter artificiellement le nombre d'échantillons (Guiot 1991). Le logiciel 3pBase (module *Calrob*) a été utilisé pour le calcul des fonctions de réponses sur l'ensemble de la chronologie (Guiot et Gœury, 1996). Parallèlement, à l'aide du logiciel DENDROCLIM2002 (Biondi et Waikul 2004), un calcul similaire a été réalisé sur une fenêtre mobile pour mettre en évidence d'éventuelles évolutions dans le temps dans la réponse radiale des pins de Salzmann au climat. Une fenêtre de 30 années a été sélectionnée en raison de la longueur des chronologies fournies par les pins. Pour le calcul des fonctions de réponse sur un intervalle mobile, les données climatiques issues du modèle Tyndall ont été utilisées.

Les résultats des calculs sont présentés sous la forme d'un rapport entre le coefficient de régression moyen de chaque variable mensuelle et l'écart type associé. Ce rapport, significatif à 95 % quand il est supérieur en valeur absolue à la valeur 1,96, donne la force de la relation pour chaque variable en tenant compte de l'incertitude du modèle (Guiot et Nicault 2010).

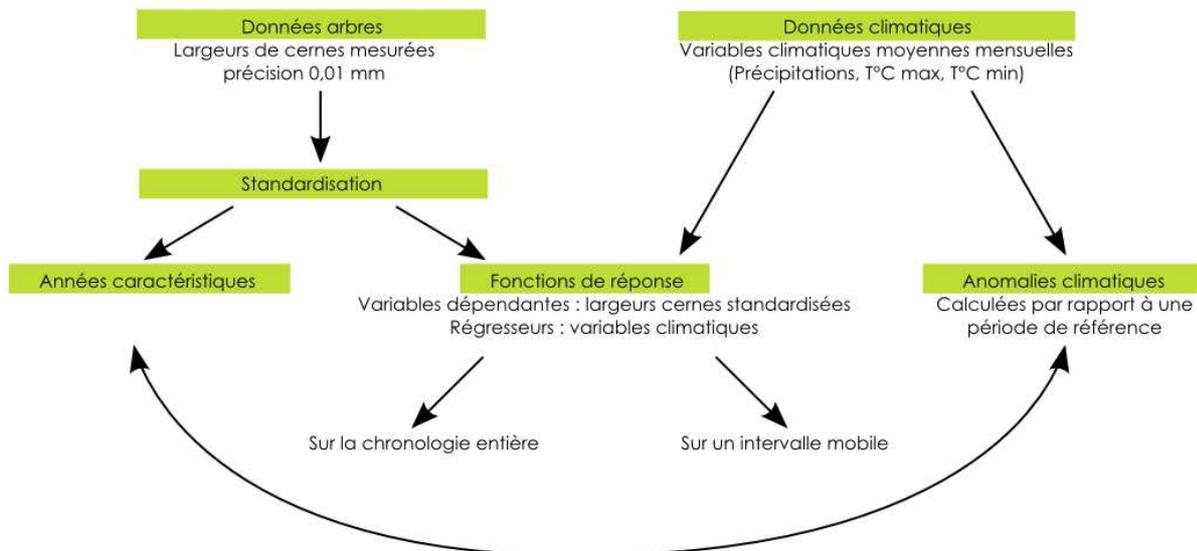


Figure 10. Diagramme synthétique des principales étapes de l'étude des relations cernes – climat en dendroécologie. À partir des données arbres et des données climatiques, chaque encadré est détaillé dans le texte. Source : Amodei.

I.5. Analyses statistiques

I.5.1. Variance partagée entre populations

Une analyse en composantes principales a été effectuée sur les années caractéristiques mises en évidence dans la période commune 1878-2007 pour évaluer la variance commune partagée par les chronologies des trois sites du Conflent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre). Cette approche permet de faire ressortir les variances partagées entre les sites d'études et de comprendre quelles variables écologiques ou climatiques expliquent leur répartition selon les axes factoriels.

I.5.2. Variabilité des réponses individuelles

Pour évaluer la variabilité de réponse au sein d'un même site, le pourcentage de variance expliqué (ou coefficient de détermination R^2) pour chaque modélisation lors du calcul des fonctions de réponse a été apparenté à une variable aléatoire indépendante. Cette variable exprime la qualité de la modélisation mais également l'intensité de la réponse d'un individu au paramètre climatique testé (P, TX ou TN). Ces variables (R^2) ont fait l'objet d'analyse de variance d'une part, entre sites (Conflent, gorges du Tarn et Saint-Guilhem au Roc-de-la-Jarre) et d'autre part intra-site (Ajouradou, Fond-de-Combe et Roc-de-la-Jarre). Pour s'assurer de l'homogénéité de la variance d'une population à l'autre, les tests de Levene et Bartlett ont été utilisés. D'autre part, le test de Kolmogorov-Smirnov a été mis en œuvre pour évaluer la normalité des variables R^2 au sein d'une population. Dans le cas où ces deux critères ne sont pas vérifiés, ce sont les tests non paramétriques de Mann-Whitney et Kruskal-Wallis qui ont servi à comparer les lots de variables.

I.5.3. Analyse des données climatiques

Dans le but de mettre en évidence des tendances climatiques dans le temps, chaque variable climatique a fait l'objet d'une régression linéaire.

Les données issues des stations météorologiques et du modèle climatique Tyndall ont été confrontées. Afin de déceler la présence éventuelle de tendances sur les séries temporelles communes aux deux lots de données, un test de Mann-Kendall a été réalisé. Dans le calcul des fonctions de réponse cerne-climat, les variables climatiques issues des deux sources différentes ont été traitées séparément.

II. Résultats sur les données climatiques

II.1. Confrontation des données Météo-France et Tyndall

Le test de Mann-Kendall met en évidence un lien fort entre les variables climatiques mensuelles issues des stations météorologiques Météo-France et celles issues du modèle Tyndall. Le lien entre les deux types de données est significatif sur les trois sites. Le tau de Kendall calculé sur les températures maximales est compris entre 0,86 pour le Conflent et 0,89 pour Saint-Guilhem ce qui dénote un lien très fort entre les températures maximales issues des deux types de sources (la valeur 1 signifiant un accord absolu entre les deux variables testées). Le lien entre les précipitations relevées sur les postes météorologiques et les précipitations modélisées est moins élevé que pour les températures puisque le tau de Kendall approche les 0,42 dans les Pyrénées-Orientales et atteint au maximum 0,51 dans la Lozère. De manière générale, le cumul des précipitations annuelles calculé à partir des données modélisées est quelque peu sous-estimé (entre -100 mm dans les Pyrénées-Orientales et -260 mm dans l'Hérault par rapport au cumul annuel de précipitations) par rapport aux données issues des postes météorologiques proches des sites d'études.

Toutefois, sur les sites des Pyrénées-Orientales et de la Lozère, la régression linéaire entre les deux types de données met en évidence un décalage absolu non négligeable entre les températures modélisées et les températures mesurées. Dans les Pyrénées-Orientales, les températures maximales sont sous-estimées d'environ 3,1 °C par le modèle alors qu'au contraire en Lozère, les températures minimales sont surestimées de 2,9 °C par rapport aux valeurs mesurées. Si cet écart absolu ne rentre pas en compte pour le calcul des fonctions de réponse, les températures issues du modèle Tyndall ont tout de même été rectifiées pour avoir une idée plus juste des températures réellement atteintes dans ces deux sites.

II.2. Évolution du climat entre 1901 et 2002

Les températures minimales et maximales issues du modèle spatialisé Tyndall (Mitchell *et al.* 2002) présentent une augmentation significative sur la période 1901-2002 et ce de manière plus prononcée à basse latitude. On note une augmentation linéaire de +0,010 °C par année ($p < 0,001$) des températures maximales en Lozère et dans l'Hérault et de +0,013 °C par année ($p < 0,001$) dans les Pyrénées-Orientales. L'amplitude entre les températures maximales et températures minimales calculée sur les trois sites d'étude ne présente pas de tendance significative au cours du temps.

Pour ce qui est des précipitations, aucune tendance ne ressort de manière significative sur la période en question.

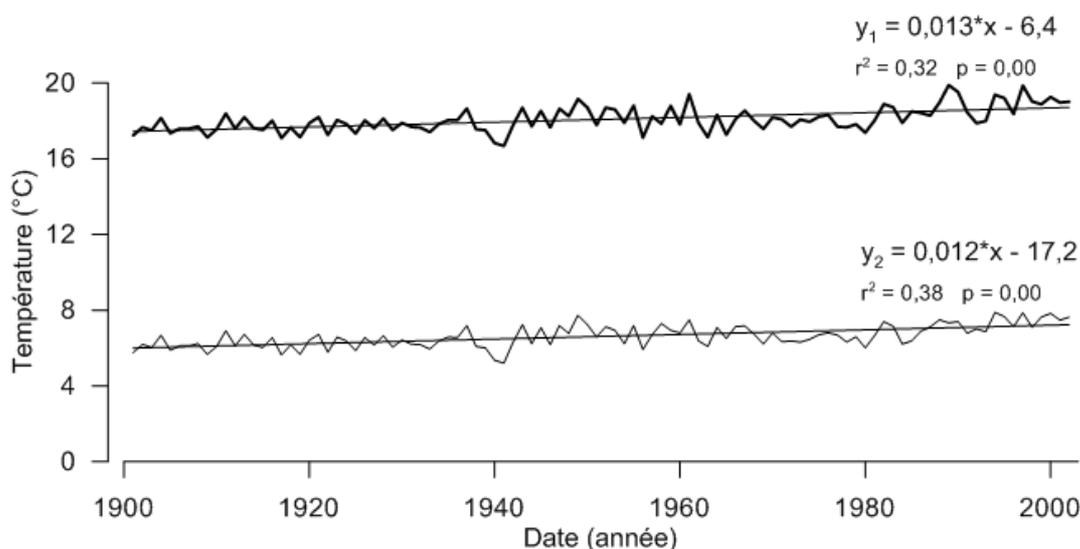


Figure 11. Évolution des températures moyennes annuelles maximales (trait épais) et minimales (trait fin) issues du modèle climatique spatialisé Tyndall en fonction du temps dans les Pyrénées-Orientales. Les équations correspondent aux résultats de la régression linéaire. Source : Amodei.

III. Résultats de l'étude inter-populations

III.1. Variabilité des patrons de croissance entre sites

La longueur des chronologies maîtresses est très variable selon les sites d'étude. La plus longue est obtenue sur le site de Saint-Guilhem où elle atteint 316 ans, les arbres y sont effectivement plus âgés en moyenne. Les deux autres sont plus modestes avec une chronologie de 259 ans sur le site des gorges du Tarn et de 158 ans dans les Pyrénées-Orientales.

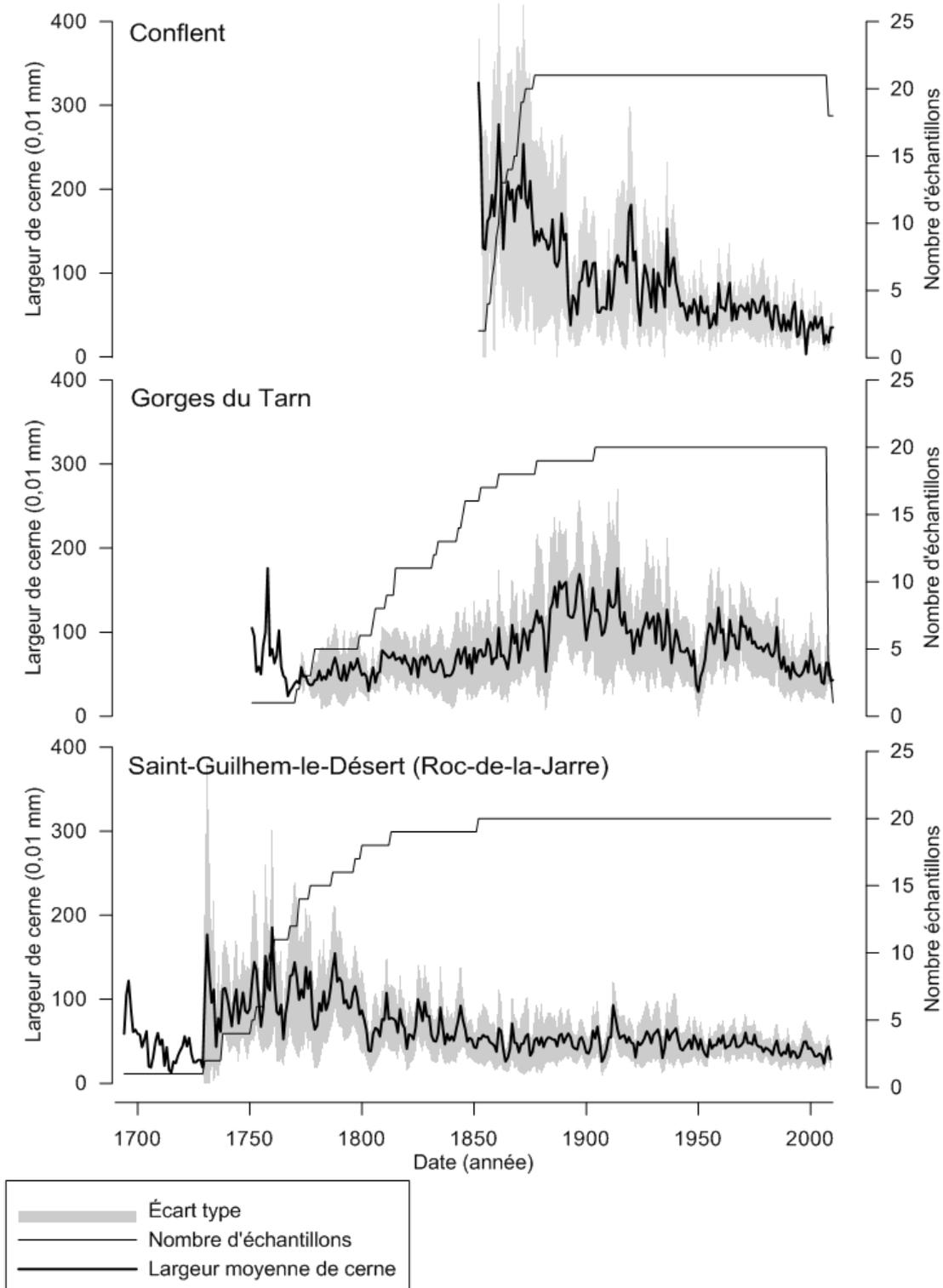


Figure 12. Largeurs de cernes moyennes sur les sites du Confluent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre) et nombre de carottes analysées en fonction du temps. La frange grisée représente l'écart type autour de la moyenne. Source : Amodei.

Dans les populations du Conflent et de Saint-Guilhem, on note une nette diminution des largeurs de cernes avec le vieillissement des individus. De façon générale sur ces sites, on constate également une diminution de l'écart type avec le temps. En effet, la largeur de cerne moyenne et l'écart type sont très corrélés. Outre l'explication purement géométrique de cette constatation, cela exprime également le fait que sous une contrainte environnementale forte, les pins de Salzmann ont tendance à répondre de manière uniforme par un cerne plus mince. Au contraire, quand les contraintes environnementales sont moins prononcées, l'amplitude des largeurs de cernes d'un arbre à l'autre augmente. La chronologie des largeurs de cernes moyennes des pins des gorges du Tarn présente un patron de croissance légèrement différent avec une phase d'augmentation de la largeur moyenne au cours du XIX^e siècle suivie d'une diminution progressive à partir de 1920. On peut imaginer que ce phénomène d'accroissement radial soit la conséquence d'une évolution de l'ambiance forestière ou encore d'une ouverture progressive du milieu mais aucun document ne renseigne l'historique précis de ces parcelles au cours du XIX^e siècle, laissant ces questions en suspens.

La sensibilité moyenne est significativement différente entre les trois sites d'étude ($p < 0,05$) et varie de 0,38 pour la population du Conflent à 0,26 dans les gorges du Tarn. La valeur élevée de la sensibilité moyenne pour les pins de Salzmann du Conflent indique une intensité marquée et homogène d'un arbre à l'autre dans la réponse radiale des arbres aux variations interannuelles de l'environnement. La moyenne des sensibilités moyennes de tous les individus rapportée à la sensibilité moyenne par site (coefficient d'interdatation) présente des valeurs très proches de 1 et jamais inférieures à 0,8 ce qui dénote un fort synchronisme dans la réponse radiale des pins sur chaque site. Les coefficients d'autocorrélation d'ordre 1 qui expriment la dépendance de la largeur du cerne de l'année t avec le cerne de l'année $t-1$ sont assez proches d'un site à l'autre et varient de 0,74 dans le Conflent à 0,77 dans les gorges du Tarn. Ces valeurs sont élevées ce qui indique une inertie marquée dans la croissance radiale d'une année sur l'autre des pins de Salzmann français. Après standardisation, les coefficients d'autocorrélation sont diminués, de 75 % au Roc-de-la-Jarre à 98 % au Conflent, ce qui signifie que les variations interannuelles qui subsistent dans les chronologies standardisées ne sont plus liées à l'effet de la croissance de l'année $t-1$ mais bien aux variations climatiques.

| Code du site | Nb. arbres | Âge | Longueur chronologie | Largeur moy. cerne (mm) | Autocorr. | Autocorr. après std. | MS | Nb. AC positives | Nb. AC négatives |
|--------------|------------|----------|----------------------|-------------------------|-----------|----------------------|------|------------------|------------------|
| CO | 21 | 156 (8) | 1844 - 2010 | 0,92 (0,20) | 0,74 | 0,014 | 0,38 | 8 | 9 |
| GT | 19 | 195 (35) | 1753 - 2010 | 0,96 (0,33) | 0,77 | 0,148 | 0,26 | 4 | 4 |
| SGJ | 20 | 247 (33) | 1694 - 2009 | 0,48 (0,14) | 0,75 | 0,19 | 0,28 | 5 | 4 |

Tableau 4. Caractéristiques dendrochronologiques des sites du Conflent (CO), des gorges du Tarn (GT) et de Saint-Guilhem au Roc-de-la-Jarre (SGJ). L'écart type est présenté entre parenthèses. Autocorr. : coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 calculé sur les chronologies brutes et sur les chronologies standardisées (Autocorr. après std.). MS : sensibilité moyenne. Le nombre d'années caractéristiques positives et négatives regroupe les années dites fortes et extrêmes (partie II, § I.2.4). Source : Amodei.

III.2. Analyse en composantes principales sur les années caractéristiques

Les axes CP1 et CP2 de l'ACP expliquent respectivement 35,77 % et 20,63 % de la variance totale. La répartition des échantillons dans le plan factoriel met en évidence deux principaux groupes, avec la population de Saint-Guilhem et des gorges du Tarn d'une part et la population du Conflent d'autre part. L'axe CP1 est partagé par tous les échantillons des trois populations avec une corrélation négative. Les années qui structurent l'axe CP1 sont des années particulièrement chaudes et sèches (1950, 1924, 1934) du côté positif et des années plutôt fraîches et arrosées (1985, 1936, 1959) du côté négatif. L'axe CP1 pourrait illustrer une réaction relativement commune dans la croissance radiale des pins de Salzmann aux évènements climatiques extrêmes. L'axe CP2 sépare nettement les arbres issus des Pyrénées-Orientales des deux autres populations. Cet axe semble lié aux particularités climatiques moyennes de chaque site et notamment aux précipitations

moyennes annuelles qui sont deux fois moins abondantes dans le Conflent que dans les gorges du Tarn et à Saint-Guilhem.

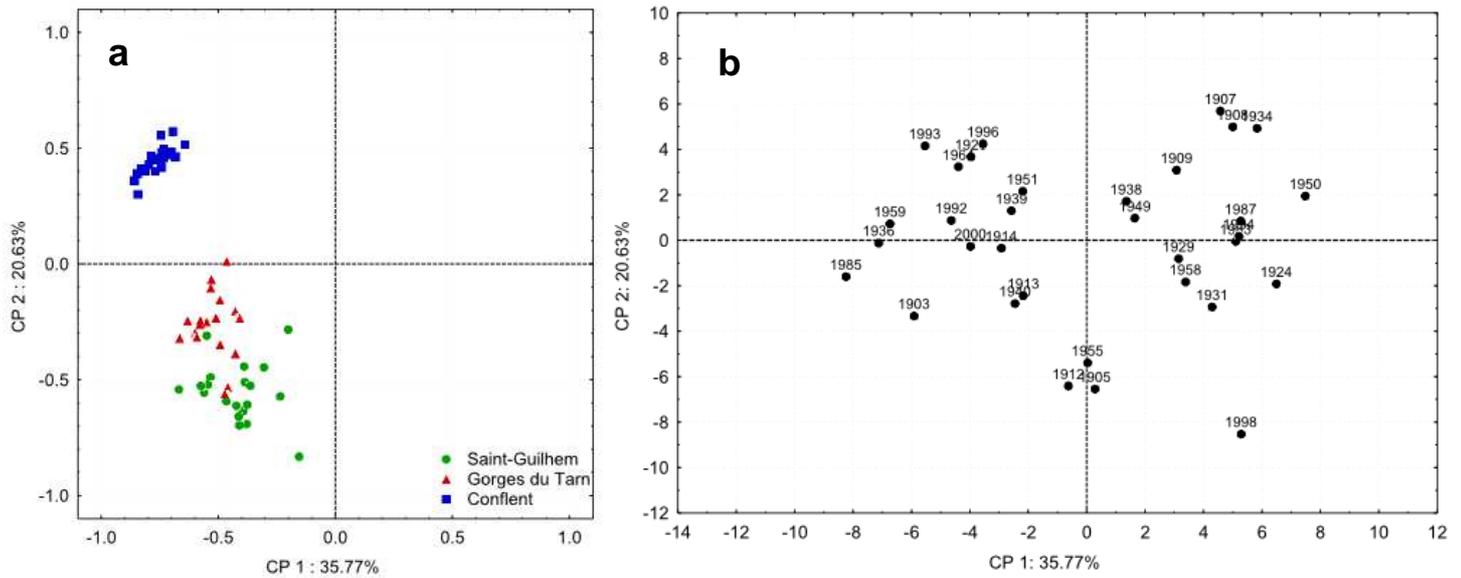


Figure 13. Analyse en composantes principales réalisée sur les années caractéristiques. a) projection des variables, b) projection des facteurs selon le premier (CP1) et second (CP2) axe principal. Source : Amodei.

III.3. Réponse des pins de Salzman au climat

III.3.1. Fonctions de réponse sur l'ensemble de la chronologie

Les fonctions de réponse ont été calculées sur l'ensemble de la chronologie qui court de 1901 à 2002.

Les pins de Salzman issus des trois sites du Conflent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem-le-Désert présentent des différences importantes et significatives dans la réponse de la croissance radiale au climat. Les résultats des fonctions de réponse calculées avec les températures maximales ou les températures minimales prises comme régresseurs sont très pochés. Pour des questions de lisibilité, seuls les résultats des fonctions de réponse calculées à partir des précipitations et des températures maximales sont présentés ici. Les résultats pour les températures minimales sont présentés en annexe 19.

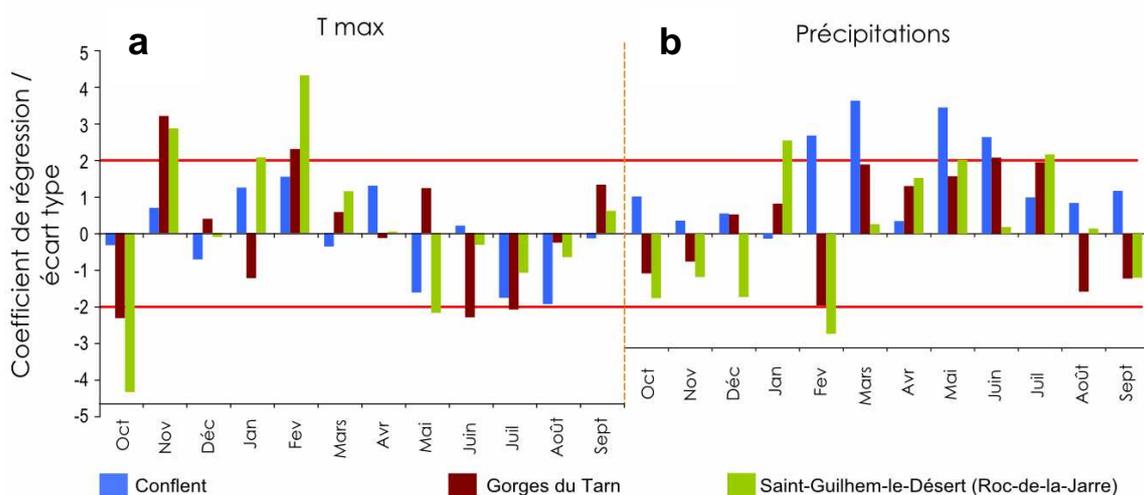


Figure 14. Résultat du calcul des fonctions de réponse sur les sites du Conflent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre) utilisant comme régresseurs : a) les températures maximales, b) les précipitations. Les variables mensuelles sont présentées en abscisses et le rapport entre le coefficient de régression moyen et l'écart type en ordonnées. Source : Amodei.

La variance expliquée par les modèles pour chaque variable et sur chaque site est en moyenne de 51 %. A Saint-Guilhem-le-Désert et dans les gorges du Tarn, les températures maximales et minimales expliquent plus de variance que les précipitations avec au maximum 56 % de la variance expliquée par les températures maximales dans le site de l'Hérault. Dans les Pyrénées-Orientales, c'est au contraire les précipitations qui expliquent le pourcentage de variance le plus élevé ($R^2 = 0,54$).

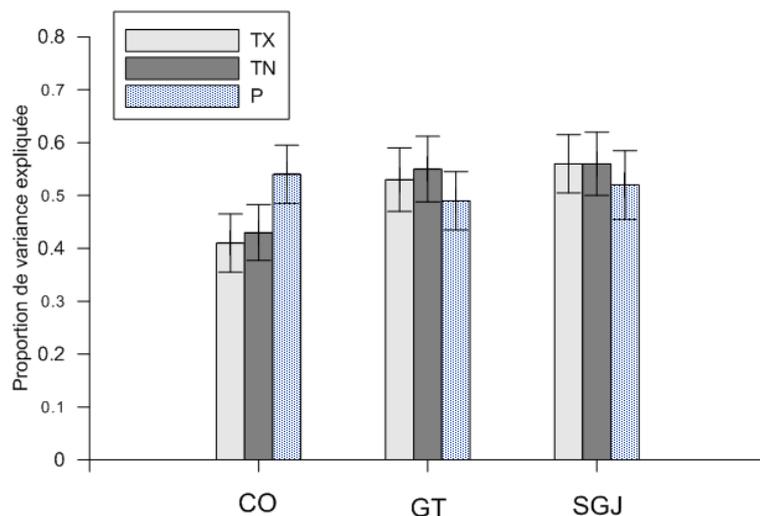


Figure 15 - Proportion de variance expliquée par les températures maximales (gris clair), les températures minimales (gris foncé) et les précipitations (bleu) sur les sites du Conflent (CO), des gorges du Tarn (GT) et de Saint-Guilhem au Roc-de-la-Jarre (SGJ). Les tirets horizontaux matérialisent l'écart type. TX : températures maximales. TN : températures minimales. P : précipitations. Source : Amodei.

Le comportement des arbres de la population des Pyrénées-Orientales présente une forte corrélation positive avec les précipitations de février, mars, mai et juin. En revanche, les corrélations avec les températures maximales ne sont pas significatives. Seules les températures minimales estivales (juillet, août) sont négativement reliées à la croissance radiale.

La population des gorges du Tarn semble moins sensible aux précipitations puisque les corrélations notamment pour la période estivale ne ressortent pas de manière significative. Ce sont plutôt les températures estivales (juin, juillet) qui sont négativement reliées avec la croissance radiale des pins sur ce site. Les températures de l'année précédant l'année de croissance ressortent significativement et de manière opposée entre les mois d'octobre (relation négative) et de novembre (relation positive).

À Saint-Guilhem, les précipitations sont positivement reliées à l'épaisseur des cernes de janvier, mai et juillet. Les mêmes relations avec les températures de l'année précédant la croissance que celles mises en évidence pour les gorges du Tarn sont identifiées : relation négative avec octobre $t-1$ et positive avec novembre $t-1$. La particularité de ce site est l'absence de corrélation avec les températures estivales et une relation positive très marquée avec les températures de février.

III.3.2. Variabilité des réponses individuelles

Au sein d'un site, les coefficients de détermination issus du calcul des fonctions de réponse pour les températures maximales ne suivent pas de loi normale (test de Kolmogorov-Smirnov non significatif) excepté dans le Conflent ($p = 0,032$). Les tests d'homogénéité de la variance entre les trois sites sont significatifs au seuil de 5 % mais pas au seuil de 1 % (test de Levene, $p = 0,037$ et test de Bartlett $p = 0,011$). Bien que les conditions pour réaliser une ANOVA ne soient pas strictement réunies, les résultats issus des tests non paramétriques et de l'ANOVA aboutissent à des résultats semblables. La différence de réponse aux températures maximales est significativement différente entre les trois sites ($p < 0,01$). Cependant, il semble que cette différence apparente soit essentiellement liée à la population du Conflent qui répond de façon très différente de celles des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem aux variables climatiques. En effet, lorsque l'on compare les sites deux à deux, les sites des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem ne sont

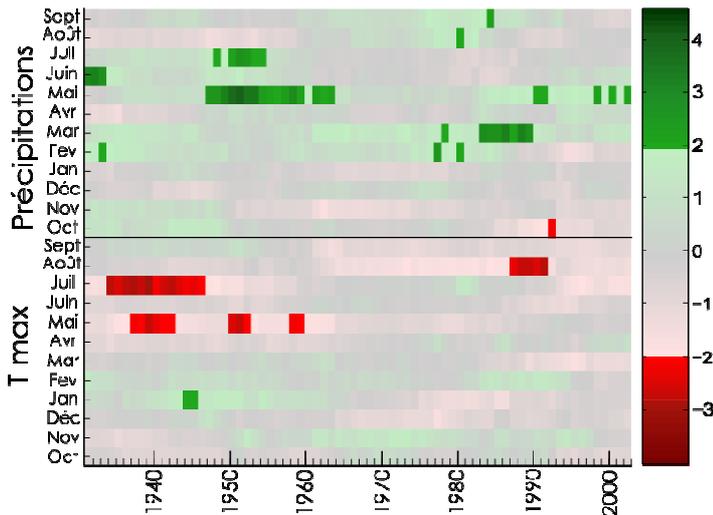
plus significativement différents dans leur réponse aux températures maximales ($p = 0,384$). Il apparaît d'autre part que la variabilité entre individus au sein d'un site est relativement forte mais reste environ quatre fois moins élevée que la variabilité observable entre les trois sites. En effet, le coefficient de variation à l'intérieur d'un site est d'environ 10 % quand la variabilité entre les trois sites (Conflent, gorges du Tarn et Saint-Guilhem au Roc-de-la-Jarre) est de l'ordre de 40 % (annexe 15).

III.3.3. Fonction de réponse sur une fenêtre mobile

Le calcul des fonctions de réponse sur une fenêtre mobile, ici fixée à 30 années, permet de mettre en évidence d'éventuelles évolutions dans le temps des relations qui lient la croissance radiale et le climat. Dans le cas présent, les chronologies indicées à partir des largeurs de cerne des arbres et les données météorologiques permettent d'avoir un recul important puisque les fonctions de réponse mobiles ont pu être calculées sur les 80 dernières années.

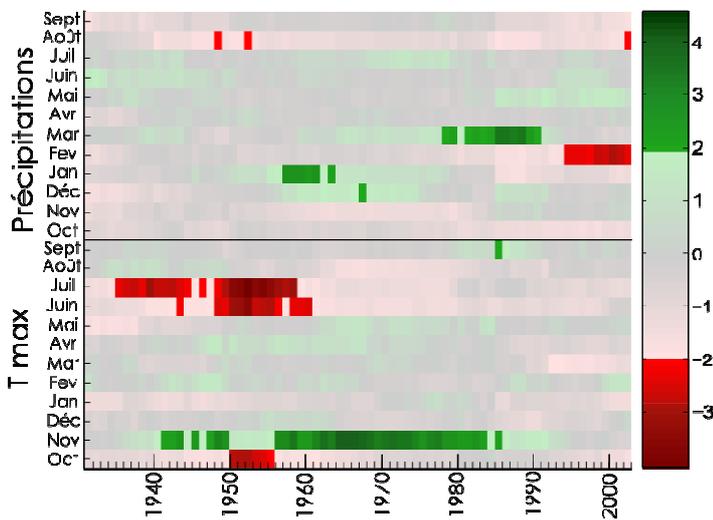
Il apparaît que depuis 1930, l'influence des différentes variables climatiques sur la croissance radiale des pins de Salzmann a évolué de manière notable au sein de chaque site. Dans les graphiques qui suivent, un pixel matérialise la significativité de la fonction de réponse calculée pour les 30 années précédentes. Les variables mensuelles sont présentées sur l'axe des ordonnées alors que l'axe des abscisses fait référence à la date.

Conflent



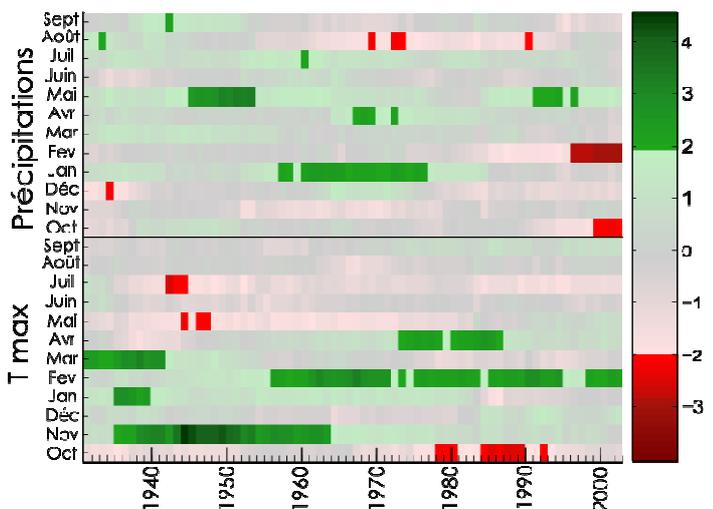
Dans le Conflent, l'effet positif des précipitations printanières élevées se retrouve de façon assez constante au cours de la période considérée. En revanche, la corrélation négative avec les températures de mai et juillet semble avoir diminué à partir des années 1960 puis s'être déplacée en août. Les températures hivernales ne ressortent pas significativement sur l'ensemble de la chronologie.

Gorges du Tarn



La population des gorges du Tarn affiche une influence très réduite des précipitations estivales sur l'ensemble de la chronologie. Les précipitations de février apparaissent corrélées négativement à partir de 1995. L'effet positif des températures de novembre $t-1$ perdure pour disparaître au cours des 15 dernières années. La relation négative avec les températures de juin et juillet n'est plus significative à partir des années 1960.

Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre)



L'effet positif des précipitations printanières (avril, mai) sur la croissance des pins de Saint-Guilhem présente un patron plus complexe et chronologiquement plus sporadique que dans les autres sites. Comme pour les gorges du Tarn, une forte relation négative avec les précipitations de février apparaît vers 1995. Les températures estivales ne jouent pas de rôle très marqué. La relation positive avec les températures de février est constante depuis 1955. L'effet des températures de novembre $t-1$ sont significatives avant 1965.

Figure 16. Résultat du calcul des fonctions de réponse sur une fenêtre mobile. L'axe des abscisses correspond à la date et les ordonnées expriment le rapport entre coefficient de corrélation et écart-type pour chaque mois des variables thermiques (Tmax) et hydriques (Précipitations). La valeur d'un pixel est significative à 95 % quand elle est supérieure à 2 en valeur absolue. Source : Amodei.

III.4. Signification des années caractéristiques

Ne sont considérées ici que les années caractéristiques fortes ($|C_i| > 1,28$) et extrêmes ($|C_i| > 1,645$) définies selon Cropper (1979). Sur la période 1901-2002, le nombre total d'années caractéristiques (fortes et extrêmes) s'élève à 17 dans les Pyrénées-Orientales, à 8 en Lozère et à 9 dans l'Hérault. La répartition entre nombre d'années positives et négatives est équilibrée sur les trois sites avec 50 % d'années négatives dans les gorges du Tarn et 44 % à Saint-Guilhem contre 53 % dans le Conflent. Sur les trois sites d'études, aucune année caractéristique forte ou extrême ne concorde. L'annexe 20 présente un tableau récapitulatif des années caractéristiques pour chaque site.

La distribution chronologique des années caractéristiques est très hétérogène à Saint-Guilhem puisque l'ensemble des années caractéristiques survient dans la première moitié du siècle et que leur fréquence d'apparition est plus homogène dans les deux autres sites. L'indice négatif de plus forte valeur absolue est observé dans le Conflent avec $C_i = -2,51$ en 1998 et l'indice positif le plus élevé en 1912 à Saint-Guilhem avec $C_i = 2,37$.

De manière générale, les années caractéristiques négatives et positives coïncident respectivement sur les trois sites avec des périodes de déficit hydrique et d'abondance de précipitations au cours de la période allant d'avril à juillet. Dans le Conflent et dans les gorges du Tarn, les années caractéristiques négatives extrêmes sont souvent le résultat combiné d'un déficit en eau et d'anomalies positives des températures maximales entre avril et juillet. L'année 1998 dans le Conflent ou les années 1949 et 1950 en sont l'illustration. En revanche, à Saint-Guilhem la confrontation entre les années caractéristiques négatives et les anomalies thermiques printanières et estivales est moins évidente. Sur ce site, il est intéressant de souligner que les années caractéristiques négatives coïncident également très bien avec des températures hivernales plus basses que la normale 1961-1990 (annexe 21).

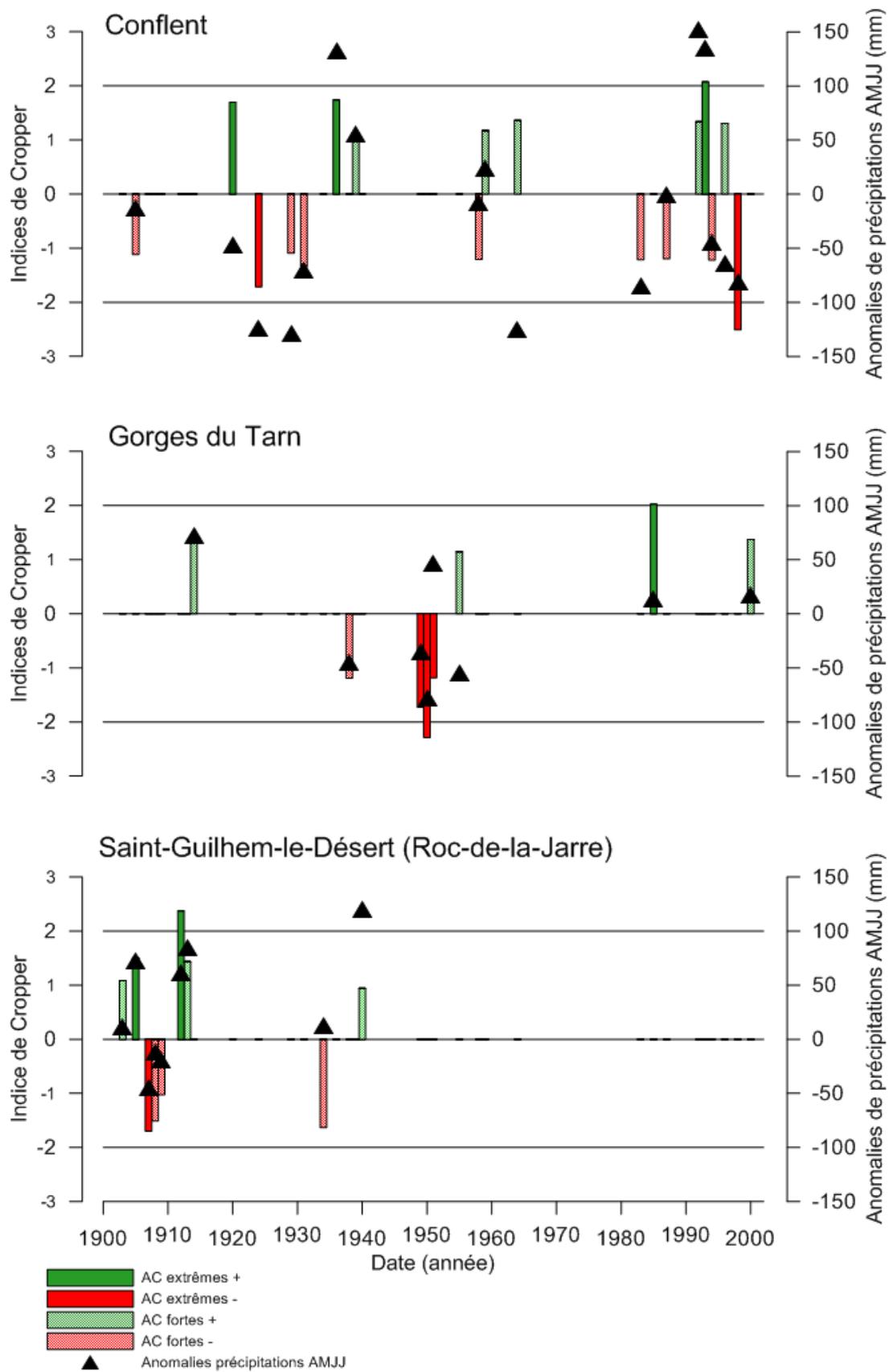


Figure 17. Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre), des gorges du Tarn et du Conflent et anomalies de précipitations d'avril, mai, juin, juillet (triangles) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps. Source : Amodei.

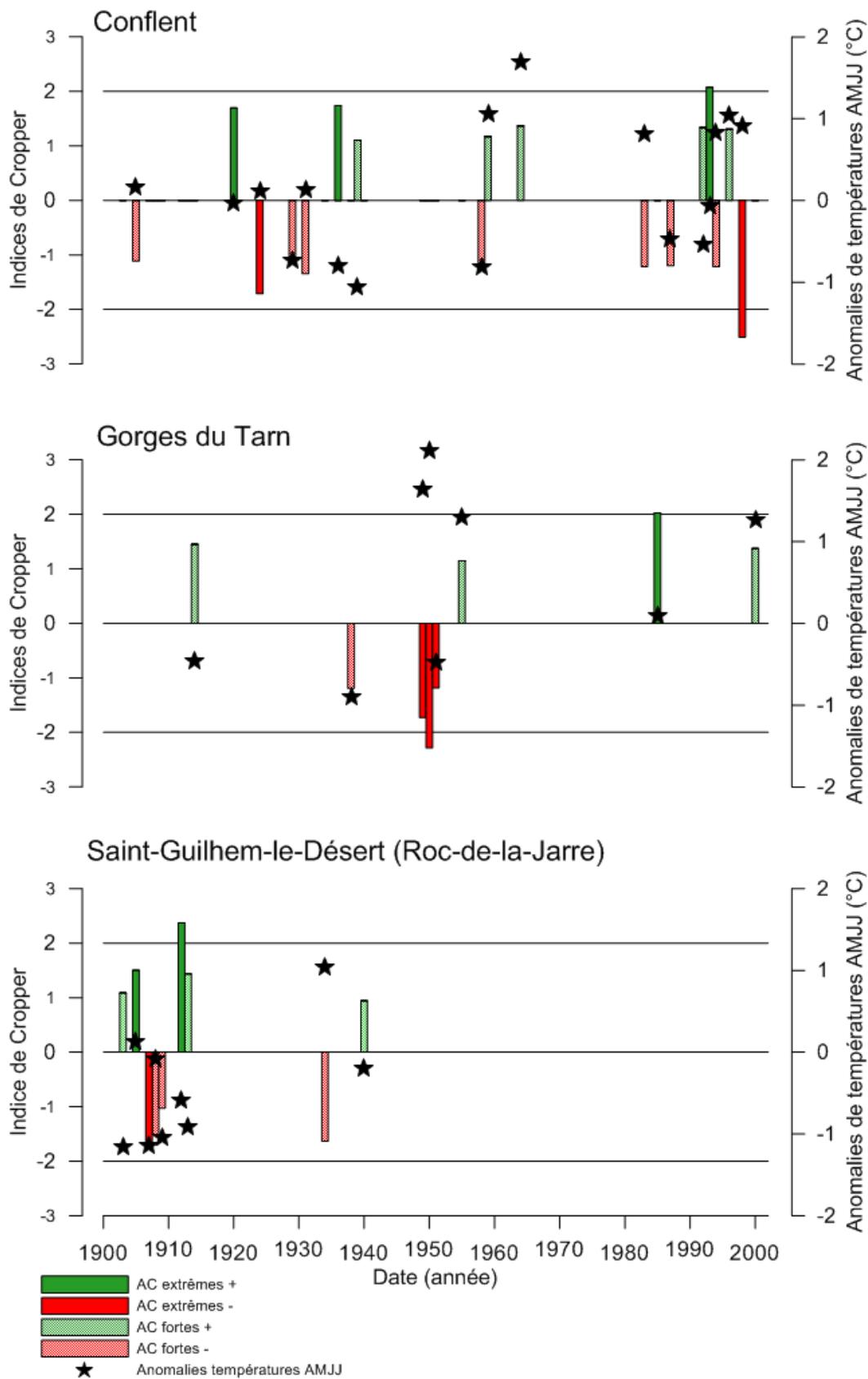


Figure 18. Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les trois sites d'études et anomalies de températures moyennes maximales d'avril, mai, juin, juillet (étoiles) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps. Source : Amodei.

III.5. Discussion autour de la variabilité de réponse au climat entre les sites

Si des traits communs propres aux pins noirs apparaissent dans la réponse radiale des pins de Salzman au climat, cette première étude fait ressortir un certain nombre de différences comportementales des pins entre les sites étudiés. Il convient donc de distinguer d'une part la population du Conflent pour laquelle les précipitations printanières ressortent comme une variable très explicative de la croissance radiale et d'autre part les peuplements des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem où l'effet des températures automnales de l'année précédente et hivernales semble plus prononcé.

III.5.1. Le Conflent

Le lien entre précipitations printanières (mars, mai et juin) et croissance radiale chez les pins de Salzman des Pyrénées-Orientales est très marqué. Climatiquement, cette région est caractérisée par un apport en eau annuel faible (période 1961-1990 : 650 mm). Les corrélations positives avec les précipitations printanières peuvent ainsi être interprétées comme un effet limitant du manque de précipitations des mois de mars à juin, l'atteinte d'un seuil critique de précipitations provoquant une diminution drastique de la croissance radiale. D'autre part, vu les conditions de pente et la texture du sol sableuse, ce résultat souligne la sensibilité des pins de Salzman à la disponibilité en eau « immédiate » au moment du démarrage de la période de végétation. Un effet positif lié au rechargement de nappe pendant la période précédant la croissance est difficilement envisageable ici car aucune relation avec les précipitations ne ressort significativement avant le mois de mars et ce de manière constante de 1930 à 2002.

La sensibilité des pins de Salzman des Pyrénées-Orientales vis-à-vis des températures maximales au cours de l'année est modérée. Comme cela s'est produit en 1998 dans les Pyrénées-Orientales (voir encadré ci-dessous), l'effet combiné d'un été sec et particulièrement chaud aboutit à un cerne extrêmement mince. Cependant, si les cernes correspondant à ces années sèches sont absents ou très minces, contrairement aux pins noirs d'Autriche et aux pins maritimes plantés dans la région, il n'a pas été constaté de dépérissements notables chez les pins de Salzman (Bernard Latour, *communication personnelle*).

Cas de l'année 1998 dans les Pyrénées-Orientales

Le cerne de l'année 1998 est absent dans 60% des carottes de pin de Salzman des Pyrénées-Orientales et lorsqu'il est présent, ce cerne est extrêmement mince ($C_i = -2,51$). Précédée d'une année chaude et relativement peu arrosée en fin d'été, l'année 1998 a connu des conditions climatiques particulièrement contraignantes d'un point de vue hydrique. Cette sécheresse s'est en effet traduite dans la région par un dépérissement massif de pins noirs d'Autriche et de pins maritimes (Bernard Latour, *communication personnelle*).

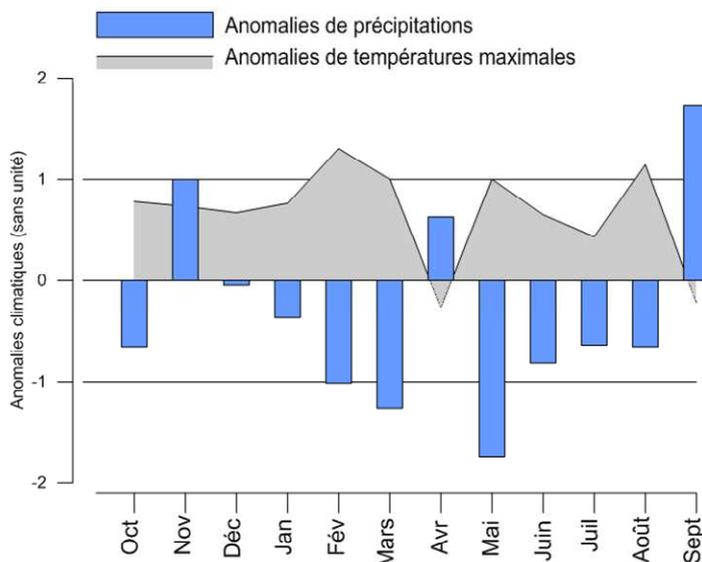


Figure 19. Anomalies climatiques mensuelles en 1998 dans le Conflent par rapport à la période 1961-1990. Source : Amodéi.

III.5.2. Saint-Guilhem-le-Désert et les gorges du Tarn

Les sites de Saint-Guilhem-le-Désert et des gorges du Tarn présentent un certain nombre de similitudes en termes de réponse radiale au climat notamment durant la période automnale précédant l'année de croissance et la période hivernale. Ces deux sites bénéficient de précipitations annuelles nettement plus conséquentes que dans le Conflent (en moyenne sur la période 1961-1990, les précipitations atteignent 1000 mm). Les corrélations respectivement positive et négative avec les températures maximales et les précipitations de février pourraient refléter une sensibilité aux froids hivernaux ou aux neiges lourdes. La corrélation positive avec les températures de février est effectivement évoquée par Linarès et Tiscar (2010) sur les sites les plus arrosés dans le Sud de l'Espagne. Les mois de janvier et février concordent avec une période singulière dans les processus physiologiques des arbres en régions tempérées puisqu'elle correspond à la phase dite de « désendurcissement » (Dereuddre et Gazeau 1992). Cette phase précède de peu la levée de dormance des plantes ligneuses et se traduit par une diminution progressive de leur résistance au froid et au gel. Debazac (1963) souligne aussi qu'à Saint-Guilhem-le-Désert, les pins de Salzmann le long des crêtes présentent des bris de flèches qu'il attribue à la casse des branches charpentières sous l'effet des neiges collantes et lourdes. Cependant, la confrontation du nombre de jours de neige mensuel avec les années caractéristiques négatives ne montre pas de concordance évidente.

Il est également opportun de considérer la relation positive entre la croissance radiale et les températures de février comme un effet bénéfique des températures élevées de février sur la reprise de l'activité photosynthétique hivernale (Lebourgeois 2000). Wieser (1997) a en effet montré qu'une reprise partielle de l'activité photosynthétique au cours de l'hiver chez le pin cembro (*Pinus cembra*) était possible à la faveur de températures hivernales plus élevées. À Saint-Guilhem-le-Désert, où les températures hivernales (décembre, janvier, février) sont en moyenne plus élevées que sur les deux autres sites de près de 2 °C, il est possible que la phase de dormance soit effectivement moins profonde expliquant le poids très important des températures de février sur la croissance radiale.

La corrélation négative de la croissance radiale avec les températures maximales d'octobre $t-1$, aussi mise en évidence par Linarès et Tiscar (2010) et Génova et Cancio (1999) en Espagne, est interprétée comme l'effet négatif de sécheresses automnales tardives au moment de l'initiation des bourgeons pour l'année à venir. On comprend aussi qu'à la faveur de températures d'octobre plus élevées, l'activité photosynthétique et la croissance radiale se poursuivent, amenuisant alors les réserves métaboliques disponibles pour la mise en place du bois initial de l'année suivante (Andreu *et al.* 2007). Cette période (octobre et novembre) est également une phase charnière dans la maturation des cônes du pin de Salzmann. Les années de forte fructification, une part importante de la ressource en carbohydrates est détournée vers le développement des parties reproductives (Kramer et Kozlowski 1979) au détriment de l'appareil végétatif. On peut alors concevoir que des sécheresses marquées en fin d'automne peuvent affecter la croissance radiale ultérieure lors d'années de forte fructification.

Enfin, ces deux populations présentent une sensibilité significative mais peu prononcée aux sécheresses printanières et du début d'été. Il semble donc que ces populations nécessitent une alimentation hydrique suffisante au moment de la reprise de l'activité cambiale et de la formation du bois initial et que des sécheresses estivales trop marquées soient responsables d'accroissements annuels faibles.

L'encadré qui suit présente le cas particulier de l'année 1949 dans le peuplement des gorges du Tarn.

L'année 1949 dans les gorges du Tarn

En 1949, le peuplement de pin de Salzman des gorges du Tarn a fait les frais du passage d'un violent incendie. Cet incident est visible dans les séries de cernes d'accroissement des arbres et ce pendant plusieurs années après l'incendie. Les cernes des deux années qui ont suivi le passage de l'incendie restent extrêmement minces ($C_{1950} = -2,29$ et $C_{1951} = -1,18$). La diminution observée dans la largeur des cernes pour ces trois années est probablement liée à une destruction partielle du houppier des arbres, diminuant ainsi pendant plusieurs années la capacité photosynthétique des pins ayant survécu. Les conditions stationnelles ont pu aussi être affectées, diminuant par exemple la teneur en eau dans les horizons superficiels du sol ou perturbant la microflore et la microfaune de celui-ci. D'autre part, les pins de Salzman dans les gorges du Tarn présentent une sensibilité accentuée aux températures de juillet et août tout à fait remarquable à partir de 1949 et ce pendant une dizaine d'années. Les conséquences induites par l'incendie de 1949 apparaissent ainsi comme des paramètres confondants avec l'effet des variables climatiques sur la croissance radiale des pins de Salzman sur plusieurs années.

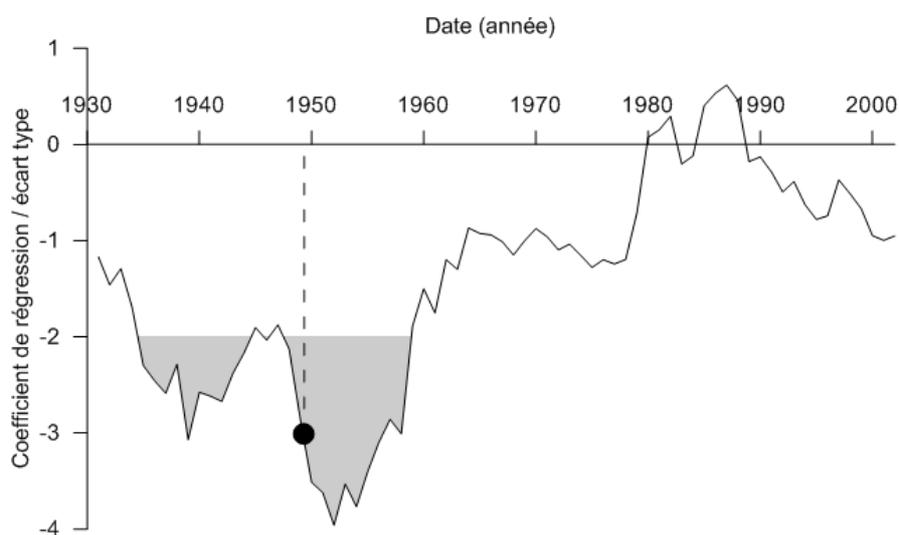


Figure 20. Résultat de la fonction de réponse sur un intervalle mobile pour les températures du mois de juillet dans les gorges du Tarn. Le point positionne l'incendie de 1949. La zone grisée correspond aux années pour lesquelles le rapport coefficient de variation / écart type est significatives à 95 %. Source : Amodei.

III.5.3. Synthèse intersites

Les variables climatiques influençant la croissance radiale sont différentes d'une population à l'autre. Sur la population du Conflent, c'est le facteur hydrique (printanier) qui est largement corrélé à la croissance tandis que les populations plus septentrionales présentent une sensibilité plus prononcée vis-à-vis des variables thermiques (températures automnales et hivernales).

Les nuances observées dans la réponse de la croissance radiale dénotent une potentielle capacité adaptative des pins vis-à-vis des conditions climatiques locales. Fady *et al.* (2010) ont montré qu'il existe une différence génétique significative, même si elle est faible, entre les populations de pin de Salzman français. Ce résultat soutient l'hypothèse que les différences observées entre sites peuvent trouver une part de leur explication dans cette différenciation génétique. Cependant, il faut rappeler que les microsatellites étudiés n'entrent pas en compte dans la croissance radiale des pins mais illustrent potentiellement une variabilité génétique globale entre populations.

Par ailleurs, il est vraisemblable que les différences climatiques notables entre les sites soient aussi en grande partie à l'origine des différences de croissance radiale constatées. D'autres facteurs, non climatiques, peuvent aussi être avancés pour expliquer les différences de réponse entre les trois sites. Le type de substrat semble notamment jouer

un rôle de premier plan dans la distribution du pin de Salzman (Debazac 1971) ainsi que dans leurs réponses radiales au climat (Génova et Martinez-Morillas 2002). À l'image des résultats obtenus par Génova et Martinez-Morillas (2002), il est envisageable que l'effet des précipitations printanières sur la croissance radiale soit amplifié par le substrat gneissique dans le Conflent tandis que l'effet des précipitations dans les gorges du Tarn et à Saint-Guilhem-le-Désert soit atténué par les substrats dolomitiques.

L'influence des caractères physico-chimiques du sol sur la croissance radiale du pin de Salzman n'est pas facilement évaluable. La texture sur les trois sites est à dominance sableuse et, par conséquent, retient médiocrement l'eau dans les horizons superficiels. Du point de vue chimique, la différence de pH, plus acide dans le Conflent que sur les deux autres sites, est difficilement exploitable en raison de l'absence de travaux ayant montré un lien entre le pH du sol et la croissance radiale des pins. Une explication plus physique pourrait être avancée en relation avec les mécanismes d'altération des roches dolomitiques. Sur les sols dolomitiques dits ruiformes, à la faveur d'importantes et d'abondantes fissures dans la roche, il est envisageable que les racines pénètrent en profondeur pour atteindre des nappes d'eau plus basses limitant ainsi l'impact de la texture de ces sols tandis que les sols cristallins altérés par action mécanique ne présentent pas le même type de fissures.

Au final, trois facteurs peuvent être avancés pour expliquer les différences notées entre la population du Conflent et les deux populations plus septentrionales : 1) les précipitations moyennes annuelles, 2) le type de substrat (dolomitiques ou bien gneissique), 3) une diversité génétique entre populations (Fady *et al.* 2010). Les deux premiers facteurs se rapprochent de ce qui est nommé la plasticité phénotypique : la capacité d'un individu à changer de « comportement » sans modification du patrimoine génétique.

Martin-Benito *et al.* (2010) ont montré une intensification de l'effet négatif des températures estivales sur la croissance radiale des pins noirs espagnols depuis les années 1990. Ce résultat est principalement expliqué par l'augmentation des températures qui, notamment durant la période estivale, sont liées à des périodes de sécheresse plus intenses et plus fréquentes. Dans notre calcul des fonctions de réponse sur un intervalle mobile, ces résultats ne sont pas confirmés pour les pins de Salzman français. C'est un phénomène plutôt inverse que l'on constate puisque la relation négative entre la croissance radiale et les températures estivales (juin, juillet, août) n'apparaît plus significative à partir des années 1960 sur les trois sites alors que l'augmentation des températures est pourtant bien avérée depuis le début du XX^e siècle (en moyenne +0,01 °C/an). De fait, la période de 1942-1955 correspond à une première vague de chaleur survenue au cours du XX^e siècle avec en moyenne + 1 °C par rapport à la période 1961-1990 pendant les mois les plus chauds (juillet, août).

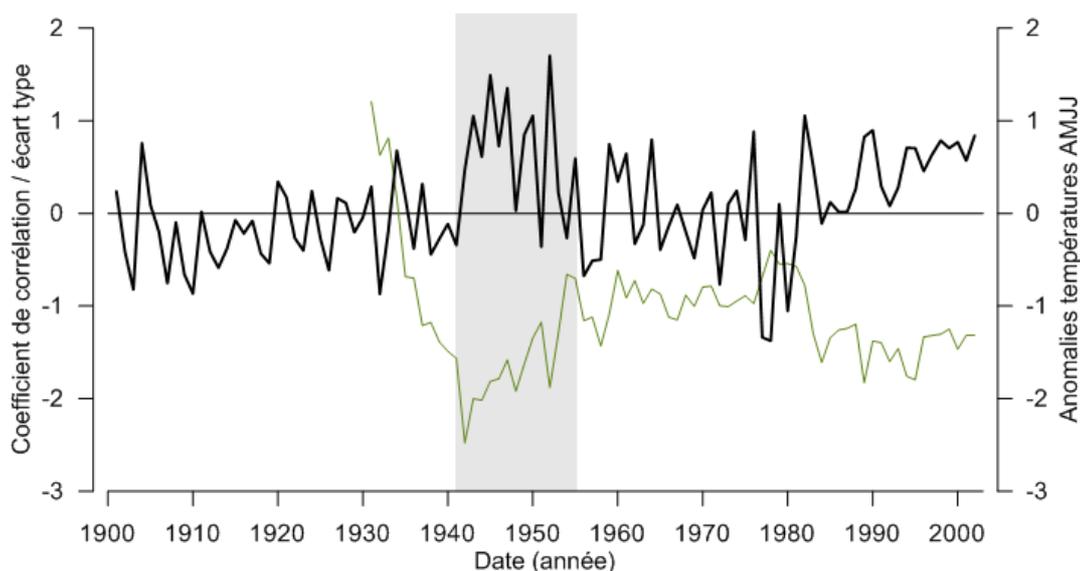


Figure 21. Évolution au cours du temps du coefficient de régression issu de la fonction de réponse sur fenêtre mobile pour Saint-Guilhem-le-Désert (trait fin) et anomalies climatiques des températures maximales d'avril, mai, juin et juillet (trait épais) par rapport à la période de référence 1961-1990. La zone grisée délimite la période 1942-1955 présentant des anomalies thermiques positives. Source : Amodei.

Parmi les résultats des fonctions de réponse faites sur une fenêtre mobile, l'effet négatif des températures de juillet et août sur la croissance radiale constaté sur les trois sites au cours de la période 1940-1960 concorde assez bien avec les anomalies de températures enregistrées sur cette même période et dont les effets ont probablement été accentués par l'incendie survenu en 1949 dans les gorges du Tarn. Après 1960, l'effet des températures estivales sur la croissance ne ressort plus de manière significative alors qu'à partir des années 1990, les températures égalent puis dépassent les maxima atteints dans les années 1950. Linares et Tiscar (2010) ont émis la possibilité d'une plus grande capacité d'adaptation des pins de Salzmann chez les individus âgés ou dominants (Martin-Benito *et al.* 2008). Dans notre étude, les arbres carottés sont âgés entre 140 et 350 ans. L'absence de toute corrélation significative avec les températures estivales à partir de 1960 pourrait être l'expression d'une plasticité des pins de Salzmann face à l'augmentation enregistrée des températures ? Cette hypothèse est à nuancer car d'autres facteurs non climatiques pourraient aussi partiellement expliquer la diminution de cet effet sur la croissance radiale. Sélectionnés parmi les arbres dominants, les pins analysés ont pratiquement tous le même âge avec en moyenne trois grandes « classes d'âge » : de 200 à 270 ans dans l'Hérault, de 170 à 230 ans en Lozère et de 140 à 160 ans dans les Pyrénées-Orientales. Ainsi, si la standardisation des données brutes élimine l'effet de l'âge dans les chronologies, il est envisageable qu'au cours de leur vie et de leur développement ontogénétique, les pins de Salzmann réagissent différemment vis-à-vis de certaines variables climatiques. Dans le Conflent, il est aussi possible d'imaginer que l'évolution de l'ambiance forestière survenue au fil des différentes phases de reboisement RTM ait modifié l'effet de certaines variables écologiques comme par exemple l'intensité du rayonnement incident au sol.

IV. Résultats de l'étude intra-population

IV.1. Variabilité des schémas de croissance selon la station

Les arbres du Fond-de-Combe et de l'Ajouradou sont en moyenne nettement moins âgés (respectivement 157 et 175 ans) que ceux installés sur le Roc-de-la-Jarre (247 ans). Comme pour le site du Roc-de-la-Jarre, les largeurs de cernes moyennes sur l'Ajouradou montrent une tendance décroissante dans le temps lié au vieillissement des arbres (effet âge). Sur le site du Fond-de-Combe, entre la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e, les largeurs de cernes présentent plusieurs séquences de décroissance sur une dizaine d'années. Les largeurs de cerne moyennes sur l'Ajouradou (0,93 mm) et le Fond-de-Combe (1,17 mm) sont nettement plus importantes que sur le Roc-de-la-Jarre (0,48). Cela s'explique en partie par le fait que les arbres carottés sur le Roc-de-la-Jarre sont beaucoup plus âgés que sur les deux autres sites.

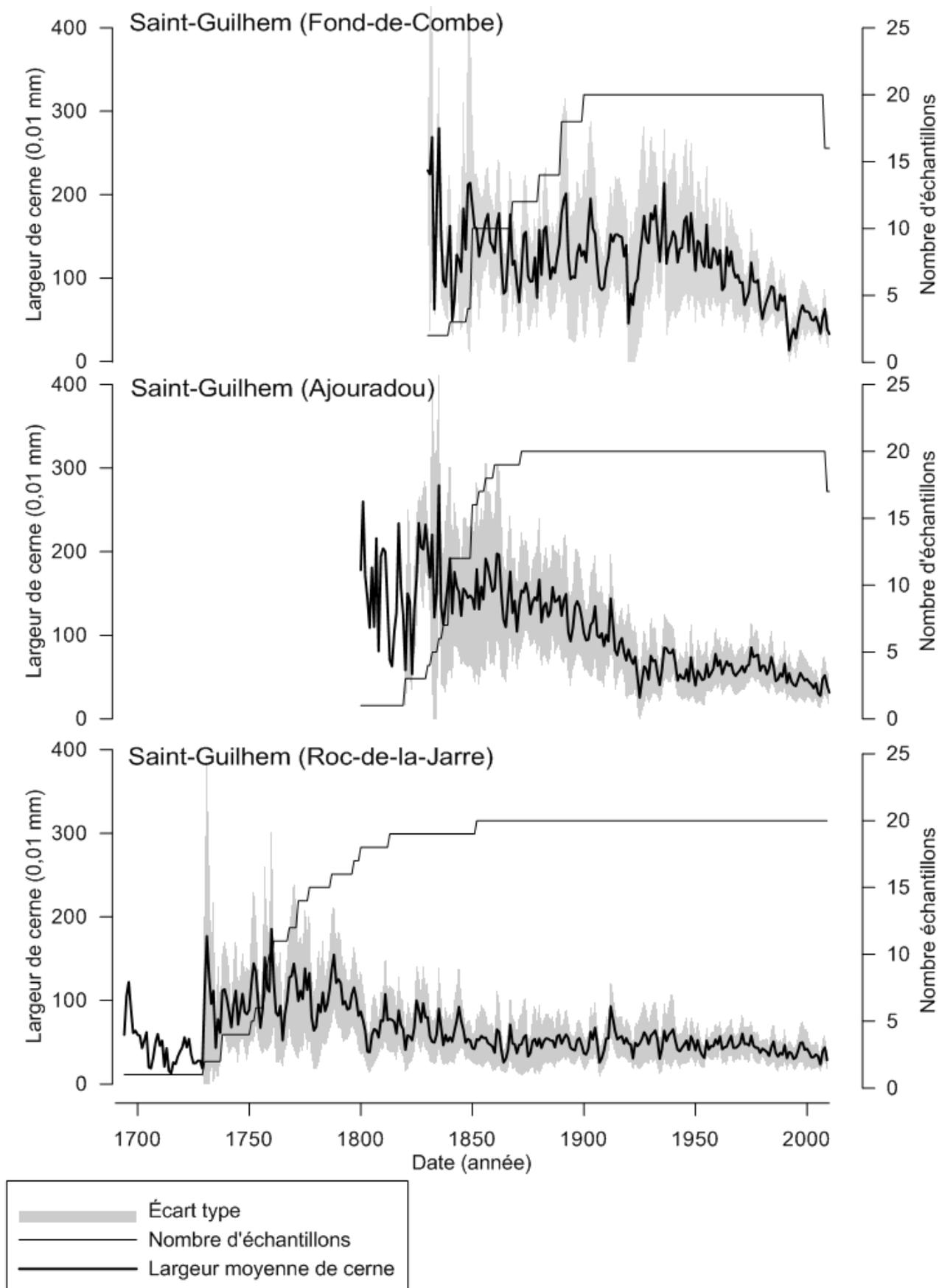


Figure 22. Largeurs de cernes moyennes sur les sites de Fond-de-Combe, de l'Ajouradou et du Roc-de-la-Jarre et nombre de carottes analysées en fonctions du temps. La frange grisée représente l'écart type autour de la moyenne. Source : Amodei.

La sensibilité moyenne des arbres du Fond-de-Combe est significativement différente ($p < 0,001$) des deux autres sites avec en moyenne une valeur de 0,33 contre 0,27 à l'Ajouradou et 0,28 au Roc-de-la-Jarre. En revanche, la sensibilité moyenne entre les sites de l'Ajouradou et du Roc-de-la-Jarre n'est pas significativement différente. Les pins de Salzman poussant à Fond-de-Combe semblent marquer de façon plus intense les variations de l'environnement dans les cernes d'accroissement. Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 est en moyenne légèrement plus élevé à l'Ajouradou avec 0,79 contre 0,71 (Fond-de-Combe) et 0,75 pour le Roc-de-la-Jarre mais ces différences ne sont pas significatives. La remarque du § III.1 (partie II) concernant les valeurs du coefficient d'autocorrélation est applicable dans le cas présent : les pins de Salzman à Saint-Guilhem-le-Désert présentent une forte dépendance entre la largeur du cerne de l'année $t-1$ et celle de l'année t . Après standardisation, les coefficients d'autocorrélation sont diminués, de 68 % au Fond-de-Combe à 82 % à l'Ajouradou. Ainsi, les indices des chronologies standardisées sont bien décorrélés d'une année sur l'autre et les variations interannuelles mises en évidence correspondent alors à l'effet du climat.

| Code du site | Nb. Arbres | Âge | Longueur chronologie | Largeur moy. cerne (mm) | Autocorr. | Autocorr. après std. | MS | Nb. AC positives | Nb. AC négatives |
|--------------|------------|----------|----------------------|-------------------------|-----------|----------------------|------|------------------|------------------|
| SGF | 20 | 157 (27) | 1810 - 2010 | 1,17 (0,29) | 0,71 | 0,228 | 0,33 | 4 | 8 |
| SGA | 29 | 175 (16) | 1796 - 2010 | 0,93 (0,23) | 0,79 | 0,141 | 0,28 | 6 | 3 |
| SGJ | 20 | 247 (33) | 1694 - 2009 | 0,48 (0,14) | 0,75 | 0,19 | 0,28 | 5 | 4 |

Tableau 5. Caractéristiques dendrochronologiques des sites de Fond-de-Combe (SGF), de l'Ajouradou (SGA) et du Roc-de-la-Jarre (SGJ). Les écart-types sont présentés entre parenthèses. Autocorr. : coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 calculé sur les chronologies brutes et sur les chronologies standardisées (Autocorr. après std.). MS : sensibilité moyenne. Source : Amodei.

IV.2. Réponse des pins de Salzman au climat

IV.2.1. Fonctions de réponse sur l'ensemble de la chronologie

Les différences dans la réponse radiale des pins de Salzman vis-à-vis du climat selon la topographie ou la texture du sol sont moins importantes que celles mises en évidence entre les sites géographiquement éloignés. Néanmoins, un certain nombre de particularités liées aux conditions stationnelles se dégagent.

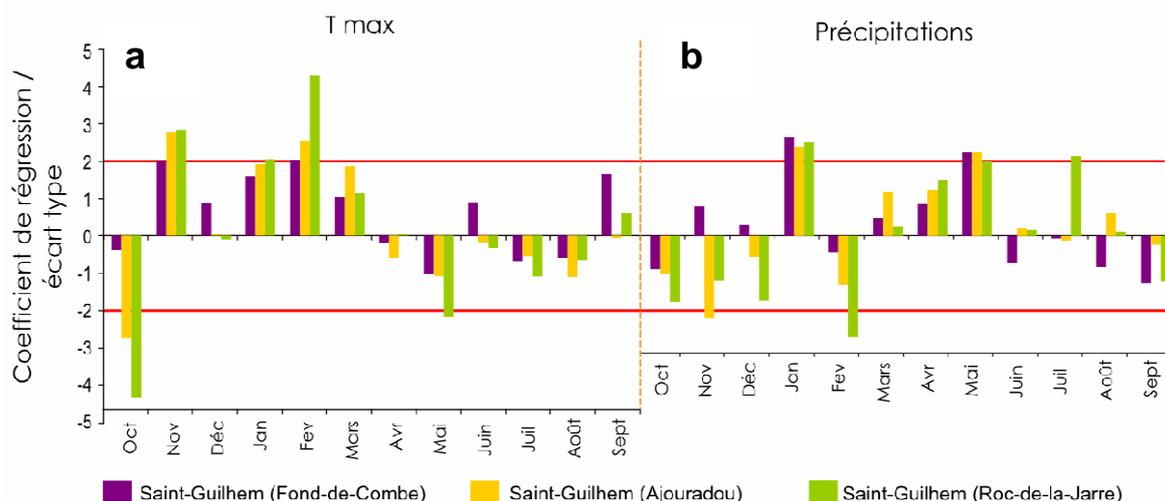


Figure 23. Résultat du calcul des fonctions de réponse calculées sur les sites de Saint-Guilhem-le-Désert (Fond-de-Combe, Ajouradou et Roc-de-la-Jarre) à partir des températures maximales (a) et des précipitations (b). Les variables mensuelles sont présentées en abscisses et le rapport entre le coefficient de régression et l'écart-type en ordonnées. Source : Amodei.

Le pourcentage de variance expliqué par les modèles est en moyenne égal à 43 % au Fond-de-Combe, 48 % à l'Ajouradou et 54 % au Roc-de-la-Jarre. De façon générale sur les trois sites de Saint-Guilhem, ce sont les températures qui expliquent le plus de variance avec des valeurs de 45 % à Fond-de-Combe à 56 % au Roc-de-la-Jarre.

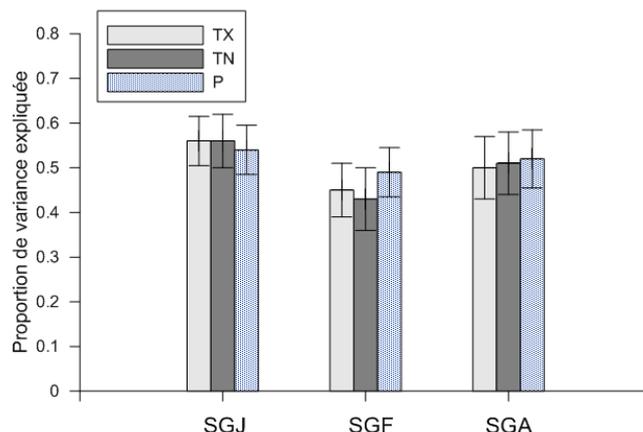


Figure 24 - Proportion de variance expliquée par les températures maximales (gris clair), les températures minimales (gris foncé) et les précipitations (bleu) sur les sites du Roc-de-la-Jarre (SGJ), de Fond-de-Combe (SGF) et de l’Ajouradou (SGA). Les tirets horizontaux matérialisent l’écart type. TX : températures maximales. TN : températures minimales. P : précipitations. Source : Amodeli.

Les arbres poussant sur les pentes du Roc-de-la-Jarre présentent une sensibilité nettement plus marquée aux températures d’octobre et novembre $t-1$, et février que les arbres de Fond-de-Combe et de l’Ajouradou. En Fond-de-Combe, la croissance radiale des pins de Salzmann est peu influencée par les températures, quelle que soit la saison. À l’inverse, la corrélation avec les précipitations de janvier et mai ressort de façon marquée. À l’Ajouradou, les variables climatiques qui influencent la croissance radiale des arbres sont assez similaires à celles du Roc-de-la-Jarre mais sont affectées d’un poids moins important : à l’Ajouradou, les corrélations entre les températures printanières et estivales et la croissance radiale ne sont pas significatives alors qu’elles le sont au Roc-de-la-Jarre. L’effet négatif des précipitations de février, très prononcé au Roc-de-la-Jarre, ne ressort pas sur les deux autres sites.

Si au vu des diagrammes des fonctions de réponse, l’importance de certaines variables climatiques paraît plus prononcée selon le type de station, statistiquement, seul l’effet des températures de février ressort de manière significativement plus importante au Roc-de-la-Jarre que sur les deux autres sites ($p < 0,05$).

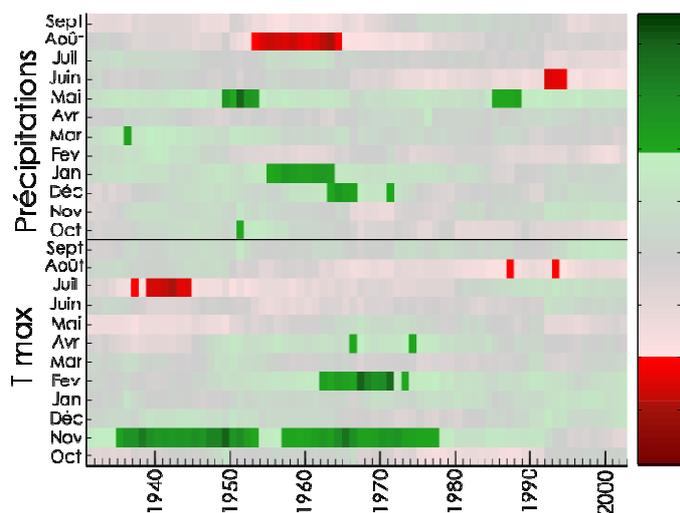
IV.2.2. Variabilité des réponses individuelles

Les tests d’hétéroscédaticité montrent que sur les sites de l’Ajouradou, de Fond-de-Combe et du Roc-de-la-Jarre les coefficients de détermination (R^2) présentent une variance homogène. Cependant, les prérequis pour réaliser une ANOVA ne sont pas vérifiés car le critère de normalité n’est pas respecté (test de Kolmogorov-Smirnov). Lorsque l’on considère ces trois sites ensemble, leurs réponses aux températures maximales ne sont pas significatives à 5 % ($p = 0,055$). Lorsqu’on compare les populations deux à deux, les résultats sont similaires (pas de différences significatives décelées) sauf entre le site du Roc-de-la-Jarre et de Fond-de-Combe où la différence de réponse est significatif au seuil de 5 % ($p = 0,022$). Dans le cas présent, la variabilité entre les trois populations de Saint-Guilhem apparaît être environ deux fois plus importante que la variabilité intra-population. Le coefficient de variation au sein d’une population reste d’environ 12 % comme lors de l’étude intersites (partie I, § III.3.2), alors que la variabilité de réponse entre les populations de Saint-Guilhem n’est plus que de 25 % (annexe 15). La divergence de réponse intersites (qui indique une variabilité de la croissance radiale sous l’effet de facteurs climatiques) est plus importante que la divergence sur les parcelles de l’étude intra-site (qui indique une variabilité de la croissance radiale sous l’effet de facteurs édaphiques).

IV.2.3. Calcul des fonctions de réponse sur une fenêtre mobile

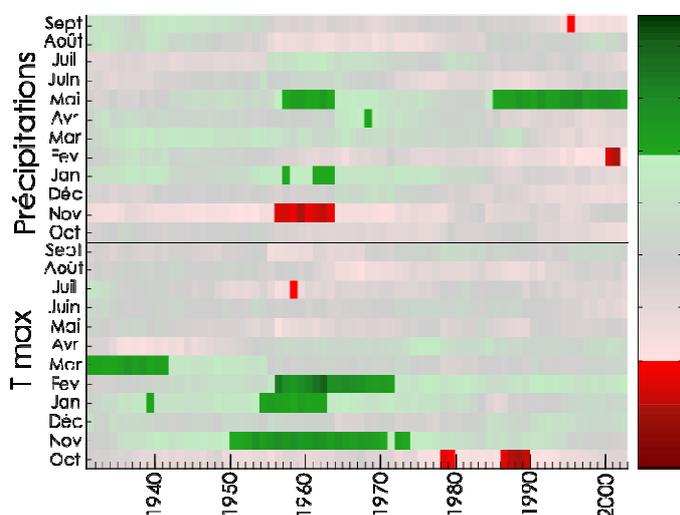
Le calcul des fonctions de réponse au cours du temps confirme les grandes tendances communes aux trois sites de Saint-Guilhem, à savoir une sensibilité aux températures hivernales forte, une faible corrélation entre la croissance radiale et les températures estivales et un effet modéré et chronologiquement épisodique des précipitations.

Fond-de-Combe



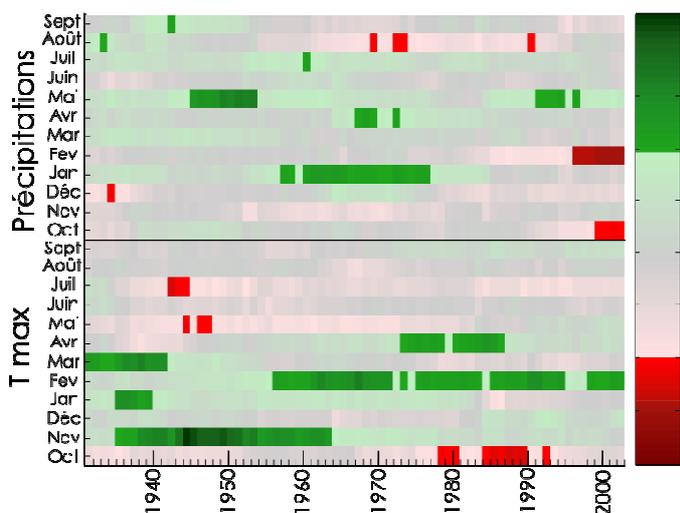
Les arbres ne présentent pas de corrélations durables dans le temps avec les précipitations. Une relation positive ressort cependant pour les mois de décembre et janvier sur la période 1955-1970. Les températures de juillet ne semblent plus influencer la croissance à partir des années 1950. La corrélation positive avec les températures de novembre $t-1$ est significative jusqu'à la fin des années 1970.

Ajouradou



Mis à part les précipitations de mai qui sont positivement et durablement corrélées avec la croissance à partir des années 1980, les précipitations ressortent de manière peu significative dans le temps. La relation positive des températures de janvier, février et novembre $t-1$ porte principalement sur la période 1950-1975. Les températures estivales ne ressortent pas de manière significative sur l'ensemble de la chronologie.

Roc-de-la-Jarre



Idem partie II, § III.3.3

Figure 25. Résultat du calcul des fonctions de réponse sur une fenêtre mobile. L'axe des abscisses correspond à la date et les ordonnées expriment le rapport entre coefficient de corrélation et écart type pour chaque mois des variables thermiques (Tmax) et hydriques (Précipitations). La valeur d'un pixel est significative à 95 % quand elle est supérieure à 2 en valeur absolue. Source : Amodei.

IV.3. Signification des années caractéristiques

Sur la période 1901-2002, le nombre d'années caractéristiques fortes et extrêmes est égal à 12 pour les arbres de la placette de Fond-de-Combe, 9 à l'Ajouradou et 9 au Roc-de-la-Jarre. La proportion entre années négatives et années positives est assez déséquilibrée sur les trois sites avec 67 % d'années caractéristiques négatives à Fond-de-Combe contre 33 % à l'Ajouradou et 44 % au Roc-de-la-Jarre.

Les années caractéristiques communes aux placettes de l'Ajouradou et du Roc-de-la-Jarre sont au nombre de 3 années positives (1905, 1912 et 1940) et 1 année négative (1934). Toutes ces années caractéristiques sont exclusivement distribuées dans la première moitié du XX^e siècle. En revanche, le site de Fond-de-Combe affiche une forte singularité dans la répartition des années caractéristiques puisque aucune année caractéristique ne concorde avec les deux autres sites. Les années caractéristiques sur ce dernier site sont réparties principalement en trois ensembles : les années 1920 à 1922, 1936 et 1937 puis 1992 et 1993. Les indices de Cropper prennent des valeurs comprises entre -2,26 pour l'année 1992 sur le site de Fond-de-Combe et 2,37 en 1912 sur le Roc-de-la-Jarre.

Dans les placettes de Fond-de-Combe et de l'Ajouradou, la correspondance entre années caractéristiques fortes et extrêmes et les anomalies climatiques des mois d'avril à juillet n'est pas toujours évidente (annexe 22 et 23). En revanche, il existe une forte coïncidence entre les années caractéristiques négatives et les déficits hydriques hivernaux ainsi qu'avec les anomalies thermiques hivernales (janvier, février et mars). Cette sensibilité aux précipitations hivernales est en accord avec les résultats issus du calcul des fonctions de réponse (partie II, § IV.2).

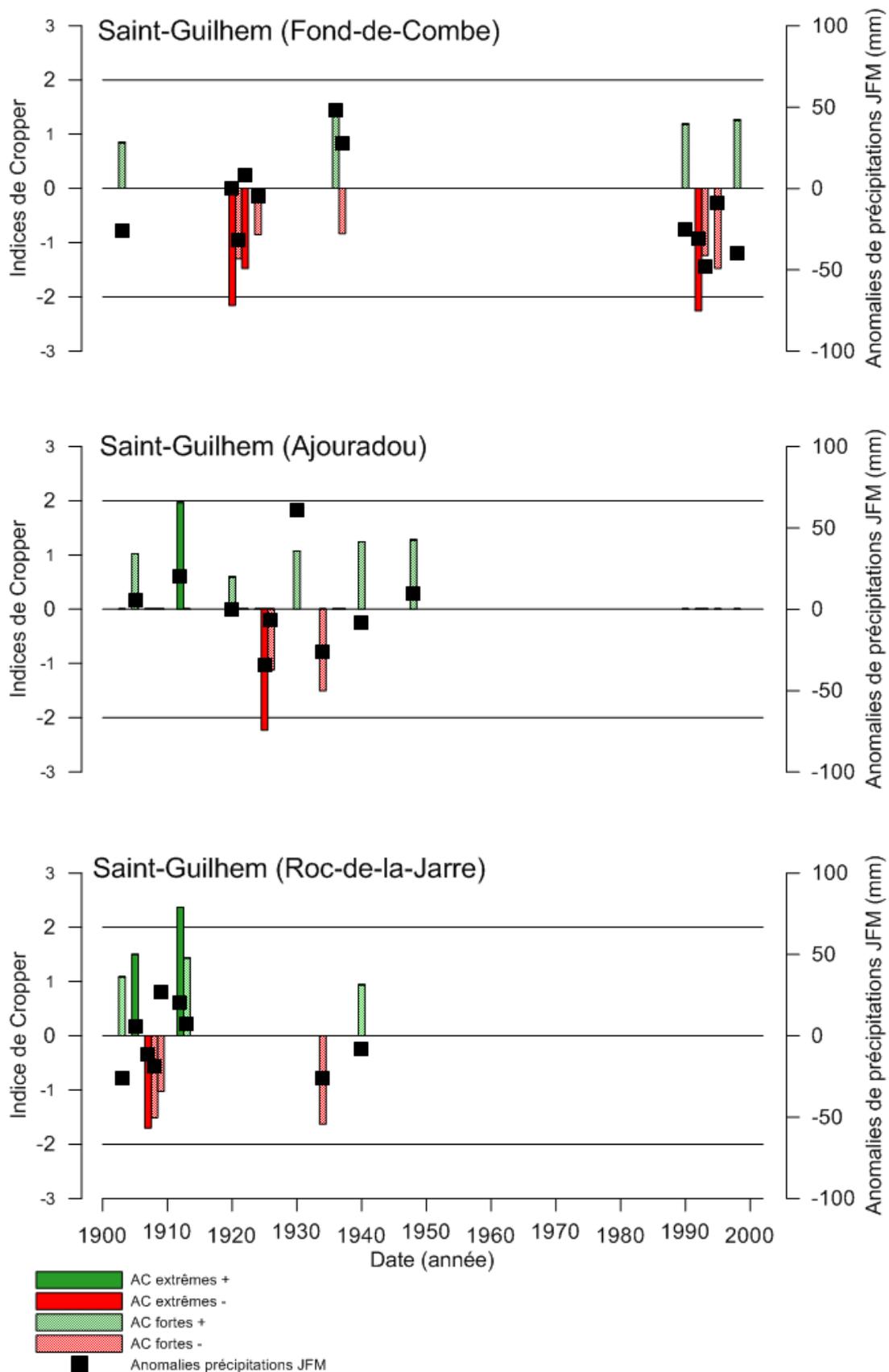


Figure 26. Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) des sites du Roc-de-la-Jarre, de Fond-de-Combe et de l'Ajouradou et anomalies de précipitations des mois de janvier, février et mars par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps. Source : Amodei.

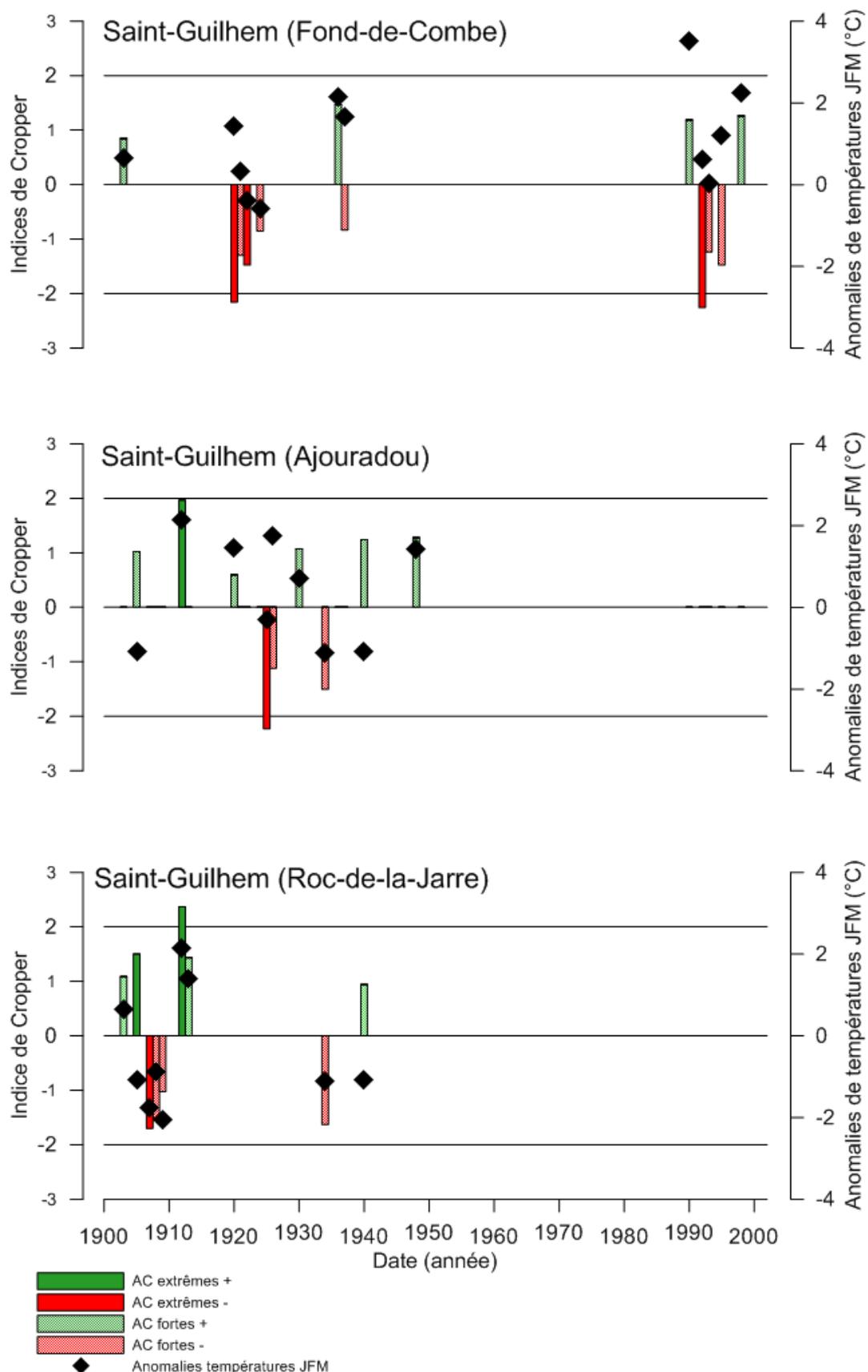


Figure 27. Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) des sites du Roc-de-la-Jarre, de Fond-de-Combe et de l'Ajouradou et anomalies de températures des mois de janvier, février et mars par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps. Source : Amodei.

IV.4. Discussion autour de l'influence de la station sur la réponse au climat

Malgré les différences édaphiques qui caractérisent les trois sites de Saint-Guilhem-le-Désert (Ajouradou sur sol fertile, Fond-de-Combe sur sol plus profond et Roc-de-la-Jarre sur forte pente et sol superficiel), des comportements communs vis-à-vis du climat se dégagent clairement : l'importance des températures précédant la période de croissance, la relation positive avec les températures hivernales et la faible dépendance de la croissance radiale avec les températures estivales. Il apparaît également que l'influence des facteurs climatiques sur la croissance radiale est légèrement atténuée sur les stations édaphiquement les plus favorables par rapport aux stations plus médiocres.

IV.4.1. Fond-de-Combe

Que ce soit au cours de la période hivernale ou estivale, les variables thermiques ne semblent que peu influencer la croissance radiale des pins de Fond-de-Combe. On peut imaginer que la position topographique plus confinée conditionne une atmosphère légèrement plus tempérée voire fraîche que les stations de versants. L'expression commune sur les trois sites d'une relation positive entre la croissance radiale et les précipitations de mai met en évidence le fait que la profondeur de sol pourtant conséquente à Fond-de-Combe (500 mm en moyenne), ne compense pas le manque d'eau au moment de la reprise de l'activité cambiale. Il est probable que la texture sableuse du sol ne permet pas la constitution d'une réserve utile en eau suffisante pour entraîner une différence significative de réponse aux précipitations printanières entre les trois sites.

La sensibilité moyenne des arbres calculée sur les pins de Fond-de-Combe (0,33) est plus élevée qu'à l'Ajouradou et au Roc-de-la-Jarre alors que l'influence des variables climatiques ressort avec moins de poids sur la croissance radiale. Dans ce site, plus accessible que les deux autres, il ne faut pas écarter l'hypothèse de l'impact de petites perturbations telles que des incendies locaux de faible ampleur susceptibles d'affecter la croissance radiale sur plusieurs années. Les années caractéristiques consécutives de 1920, 1921 et 1922 ou 1992, 1993, observées uniquement sur ce site pourraient illustrer ce genre d'évènements bien qu'aucun document historique ne les mentionne. Pour tester cette hypothèse, il pourrait être envisagé de couper quelques individus pour déceler la présence éventuelle de cicatrices incendiées (Fritts 1976) et de les dater. Une autre solution serait de réaliser des carottages au sein de jeunes individus pour vérifier s'ils appartiennent à une même vague de régénération post-incendie.

IV.4.2. Ajouradou

La présence d'un sous-étage arbustif abondant pourrait laisser envisager une compétition plus accrue pour la ressource en eau entre les différentes espèces. Cela ne semble pas être le cas puisque les relations avec les précipitations sont identiques et affectées d'un poids comparable à celles notées sur les deux autres sites où le sous-étage est pourtant très discret. En revanche, la relation avec les températures de février est significativement atténuée par rapport au Roc-de-la-Jarre. Ainsi, il est probable que ce sous-étage joue un rôle « tampon » bénéfique en maintenant une température sous couvert peu fluctuante au long de l'année et atténuant l'effet d'un froid hivernal trop marqué ou d'une sécheresse estivale.

IV.4.3. Synthèse intra-site

Au vu des résultats, il semble que l'influence de la station joue un rôle modéré dans la variabilité de réponse radiale des pins de Salzmann. Cependant, c'est bien le site plus contraignant d'un point de vue topographique et édaphique (Roc-de-la-Jarre) que l'effet des variables climatiques ressort avec le plus de poids, et que le modèle explique la plus grande variance. Autrement dit, plus les arbres sont limités par des facteurs environnementaux, plus ils présentent une sensibilité marquée aux variables climatiques (Fritts 1976). La présence d'un sous-étage et la compétition avec d'autres espèces arbustives pour la ressource en eau ne paraît pas affecter outre mesure la croissance du pin de Salzmann. Ce résultat plaide pour l'idée couramment admise du pin de Salzmann décrit comme une essence adaptée aux milieux rupicoles (partie I, § II.1.1), dont les racines ont la capacité de s'insérer

en profondeur dans des fissures, quand le sol le permet, pour aller chercher des ressources hydriques où d'autres espèces ne présentent pas cette capacité.

Les pins de Salzman de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe laissent à penser qu'ils seraient potentiellement capables d'endurer des amplitudes thermiques plus importantes que celles auxquelles sont exposés les arbres poussant sur le site déjà contraignant du Roc-de-la-Jarre. Néanmoins, pour nuancer ce propos il est bon de préciser que les arbres répondant de façon plus prononcée aux variables climatiques ne sont pas nécessairement les arbres les plus vulnérables aux conditions climatiques extrêmes.

L'encadré ci-dessous présente le cas particulier de l'année 1912 dans les peuplements de Saint-Guilhem-le-Désert.

Cas de l'année 1912 dans l'Hérault

L'année 1912 a été marquée pour les pins de Salzman des sites du Roc-de-la-Jarre et de l'Ajouradou par un cerne particulièrement large avec la formation de bois final conséquent. Climatiquement, cette année s'est caractérisée par des précipitations hivernales très importantes avec notamment pour le mois de janvier, des précipitations supérieures à la moyenne de près de 50 % (moyenne 1961-1990). S'ajoutent à cela des températures maximales de décembre, février et mars particulièrement élevées. L'été a été plutôt clément cette année-là, puisque les températures maximales ont été inférieures de 2 °C à la moyenne 1961-1990 pour les mois de juin, juillet et août et les précipitations plutôt abondantes avec + 35 mm d'eau sur les trois mois d'été par rapport à la moyenne 1961-1990.

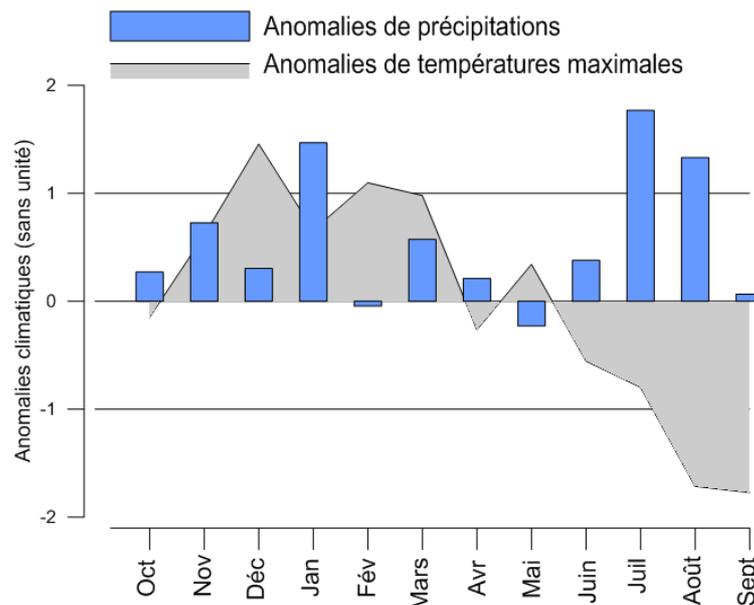


Figure 28. Anomalies climatiques mensuelles par rapport à la période 1961-1990 pour l'année 1912 dans l'Hérault. Source : Amodei.

V. Discussion générale et perspectives

V.1. Méthodologie

En termes méthodologiques, un certain nombre de points pourraient compléter avantageusement cette étude.

Dans le processus du calcul des fonctions de réponse, les variables dépendantes sont les moyennes par site des chronologies standardisées. Pour éviter de passer par un calcul de moyenne par lequel on perd de l'information, il pourrait être envisagé d'utiliser un modèle linéaire mixte. Ce calcul fait notamment intervenir un effet aléatoire du facteur qui dans le cas présent correspondrait à l'appartenance d'un individu à un site donné

La méthode de standardisation utilisée dans cette étude est très largement répandue en dendroécologie mais d'autres méthodes moins « brutales » d'indexation existent pour éliminer les tendances géométriques liées à l'âge. Par exemple, la construction d'une courbe régionale théorique consiste à échantillonner un grand nombre d'arbres d'âge cambial différent et à calculer une largeur de cerne moyenne théorique propre à une espèce et à une population dans une région donnée. Si cette méthode demande une récolte et un traitement considérable de carottes, elle permet de s'affranchir de l'effet géométrique lié à l'augmentation de diamètre avec le vieillissement de l'arbre. Parallèlement, dans un souci de quantifier l'influence de l'âge sur la relation entre la croissance radiale et le climat, il serait pertinent de réaliser des fonctions de réponse pour des classes d'âge bien déterminées.

Dans cette étude, seule la largeur totale du cerne a été prise en considération. Or il a été constaté qu'au sein d'un cerne annuel, la proportion de bois initial et de bois final (la texture, rapport entre la largeur du bois final et largeur total du cerne, permet de mesurer cette proportion) était très variable d'une année à l'autre chez le pin de Salzmann. Pour étayer le lien entre la croissance radiale et le climat, il pourrait être envisagé de mener à bien une étude densitométrique du pin de Salzmann. Cette technique permet d'affiner la réponse au climat en augmentant le nombre de variables dépendantes issus des carottes d'arbres et en mettant en œuvre des variables plus étroitement corrélées aux variables climatiques que la largeur du cerne annuel. De fait, une étude densitométrique permet en particulier d'exploiter la largeur et la densité du bois initial et du bois final.

V.2. La réponse au climat

Différentes études (Benito-Morillas *et al.* 2010, Lebourgeois 2000) ont montré que le pin noir était une essence présentant une sensibilité aux températures estivales élevées ainsi qu'au manque de précipitations printanières et estivales. Dans le bassin méditerranéen une diminution de l'accroissement radial a été mise en évidence chez les pins noirs depuis les années 1960 (Martin-Benito *et al.* 2010, Linares et Tiscar 2010, Martin-Benito *et al.* 2008) suggérant un effet des changements climatiques sur la croissance radiale et plus particulièrement celui des sécheresses estivales de plus en plus prononcées (Linares et Tiscar 2010). Pour ce qui est du pin de Salzmann, il semble que la réponse radiale au climat soit modulée selon sa situation géographique, les conditions climatiques locales ou encore le type de substrat (Génova et Cancio 1999, Génova et Martinez-Morillas 2002).

Dans notre étude, les arbres répondent de façon significativement différente aux variables climatiques locales. L'étude des relations cernes-climat par le calcul des fonctions de réponse sur une fenêtre mobile apporte un aspect temporel particulièrement intéressant dans la mesure où elle procure différents niveaux d'interprétation entre d'une part, les variables climatiques dont l'effet sur la croissance radiale reste à peu près constant sur la totalité de la chronologie considérée, et d'autre part, celles qui fluctuent dans le temps. Ainsi, il faut distinguer :

- les relations qui durent dans le temps telles que l'effet des précipitations printanières dans le Conflent, des températures de novembre $t-1$ à Saint-Guilhem et dans les gorges du Tarn ou l'absence de relation avec les températures hivernales dans le Conflent.

- les relations qui fluctuent dans le temps telles que l'effet des températures estivales qui s'atténue à partir de 1950 et 1960 ou des précipitations de février qui apparaissent à partir de 1998 dans les gorges du Tarn et à Saint-Guilhem.

Les relations permanentes pourraient être liées au poids des caractéristiques régionales invariantes des sites telles que le type de substrat (dolomitiques ou cristallin) ou aux conditions climatiques locales moyennes (précipitations ou températures annuelles moyennes). Ainsi, les différences observées entre des sites géographiquement éloignés pourraient être l'expression, dans la croissance radiale, des caractéristiques environnementales locales en lien avec des processus d'adaptation locale ou de plasticité phénotypique.

Les relations qui fluctuent dans le temps sont souvent partagées par plusieurs sites et apparaissent ou disparaissent de manière quasiment synchrones à une échelle spatiale plus large. Ces évolutions de la relation cernes-climat restent plus difficiles à interpréter et pourraient être liées, soit à une capacité de réaction et d'ajustement rapide de la croissance radiale des pins de Salzmann en réponse à des modifications climatiques, soit à une sensibilité au climat non constante au cours de la vie des pins. Soulignons que des fluctuations constatées mettent à mal le principe d'uniformité qui veut que l'effet d'une variable climatique reste constant dans le temps (Fritts 1976).

L'étude des années caractéristiques montre que si cette espèce répond aux conditions climatiques extrêmes par des cernes très fins, sa résilience à ce genre de d'évènements est très élevée malgré des accroissements quasiment nuls (exemple de l'année 1998 dans le Conflent). S'ajoute à cela le fait que même si l'effet négatif des stress hydriques estivaux sur la croissance radiale ressort globalement dans les trois sites, son poids est nettement plus faible que celui des variables hivernales (pour les sites de la Lozère et de l'Hérault) ou printanières (pour le site des Pyrénées-Orientales).

D'autre part, les incendies apparaissent comme un facteur influençant fortement la croissance radiale du pin de Salzmann en entraînant des cernes absents ou extrêmement fins sur plusieurs années. Anatomiquement, l'absence de cerne pendant plusieurs années consécutives ne provoquant pas la mort des individus (comme c'est le cas chez les arbres de Fond-de-Combe à Saint-Guilhem entre 1920 et 1925) peut s'expliquer par le fait que dans le xylème des pins, les derniers cernes formés conservent leur capacité à conduire la sève.

Les propriétés édaphiques de la station semblent être un facteur modulant la réponse radiale des pins de Salzmann au climat. Les stations les moins contraignantes atténuent l'impact du climat sur la croissance radiale tandis que les stations plus contraignantes amplifient cet impact. Dans la perspective de reboisements en région méditerranéenne, il pourrait être notamment pertinent de préciser un seuil édaphique et climatique à partir duquel les pins de Salzmann présenteraient une vulnérabilité critique pendant la période de sécheresse.

V.3. Dépérissement

L'approche dendroécologique de la croissance des pins de Salzmann utilisée ici permet d'évaluer la sensibilité des arbres aux variations interannuelles du climat mais ne donne pas d'information directe quand au risque de dépérissement des pins face à des évènements climatiques extrêmes. Pour ce faire, il pourrait être intéressant de coupler une approche dendroécologique à des modèles de dépérissement. Cela permettrait d'une part de préciser l'influence du climat sur la croissance radiale et d'autre part de comprendre quelles variables ou évènements sont effectivement responsables de la mort des individus. Cependant, il est à noter que les dernières prospections dans les peuplements de pins de Salzmann français révèlent quelques rares jaunissement de houppiers dans le Gard et l'Ardèche sur des sites où les conditions sont particulièrement défavorables mais aucune mortalité massive n'a été relevée (Turion, *communication personnelle*). Ce point reste un réel atout du pin de Salzmann pour les forestiers dans un contexte de changement globaux.

V.4. Plantations expérimentales

Un certain nombre de plantations ont déjà été réalisées dans le passé lors de diverses campagnes RTM. Utiliser les reboisements contenant des origines connues suffisamment

anciennes permettrait d'identifier la part héritable de la réponse radiale par rapport à la part environnementale au niveau inter-population. Cela permettrait d'estimer la marge de manœuvre de l'évolution des peuplements naturels en environnement changeant.

Par ailleurs, pour mieux comprendre l'importance jouée par la plasticité phénotypique et l'adaptation locale dans la réponse du pin de Salzmänn aux contraintes du milieu et pour évaluer les potentialités évolutives intrinsèques du pin de Salzmänn et réellement tester sa rusticité par rapport aux autres pins noirs, il serait intéressant d'installer un réseau de transplantations croisées en prolongement au programme en cours de conservation du pin de Salzmänn. Cette opération consisterait par exemple à planter sur le site du Conflent des pins provenant de Saint-Guilhem et des gorges du Tarn, et de répéter ce protocole sur les deux autres sites.

V.5. Gestion du pin de Salzmänn

Dans une perspective de gestion conservatoire du pin de Salzmänn, il paraît opportun de séparer les sites des Pyrénées-Orientales des deux autres. Malgré les difficultés à démêler la part de l'effet de l'évolution du climat des autres facteurs environnementaux dans la réponse de la croissance radiale des pins, l'évolution du régime des précipitations prédites par les modèles atmosphériques (IPCC 2007) doit être un paramètre à surveiller en priorité pour les populations du Conflent. Mais à l'opposé, une augmentation des précipitations au printemps (Lebourgeois 2001) pourrait être bénéfique pour la croissance des pins de Salzmänn des Pyrénées-Orientales. Dans les gorges du Tarn et à Saint-Guilhem, l'attention devrait plutôt se porter sur l'évolution des températures.

Pour évaluer au mieux l'impact des changements globaux sur le pin de Salzmänn, la mise en place de placettes expérimentales laissées à leur dynamique naturelle et installées dans différents peuplements de pins de Salzmänn est particulièrement recommandée. Pour le dendrochronologue, de telles parcelles constituent des sources potentielles de données non biaisées par l'activité humaine particulièrement intéressantes pour mieux comprendre les liens entre la croissance radiale et son environnement, tandis que pour le gestionnaire, elles permettraient de disposer d'une dynamique de peuplement de « référence » dans ce contexte climatique changeant.

Enfin, dans la perspective de reboisements en région méditerranéenne, le type de substrat semble être un paramètre fondamental lors du choix des stations. En accord avec les résultats de Génova et Martínez-Morillas (2002), sur sols dolomitiques, les pins de Salzmänn paraissent plus sensibles aux températures alors que sur sols granitiques ou cristallins, ils montrent une plus grande sensibilité aux précipitations.

Références bibliographiques

- Alejano, R., Martinez-Montes, E., 2006. Aportaciones de la paleobotanica a la interpretacion del area natural de *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* en las Sierras Béticas (surete de España). *Sistemas y Recursos Forestales*, Hors série, p.126-136.
- Andreu, L., Gutierrez, E., Marcias, M., Ribas, M., Bosch, O., Camarero, J.J., 2007. Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology*, vol.13, p.804-815.
- Arbrez, M., Millier, C., 1971. Contribution à l'étude de la variabilité géographique de *Pinus nigra* Arn. Étude comparative de quelques caractères morphologiques des aiguilles au stade juvénile. Conséquence pour la systématique de l'espèce et les tests variétaux. *Annales des sciences forestières*, vol.20, n°1, p.23-49.
- Biondi, F., Waikul, K., 2004. DENDROCLIM2002 : A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computer and Geosciences*, vol.30, p.303-311.
- Cambon, D., 2009. Programme global de conservation des populations françaises de pin de Salzmann 2008-2012. ONF DT Méditerranée, 11 p.
- Calas, M., 1900. *Le Pin laricio de Salzmann*. Imprimerie nationale, 50 p.
- Chakib, A., 2009. *Evaluation de l'état de conservation du peuplement de pins de Salzmann de la forêt domaniale de Saint-Guilhem-le-Désert (Hérault, France)*. Université Montpellier II, Master 1, 70 p.
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A., 1990. *Methods of Dendrochronology*. Klumer Academic Publishers. 408 p.
- Cropper, J.P., 1979. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin*, vol.39, p.47-54.
- Debazac, E.F., 1963. L'aire spontanée du Pin de Salzmann en France. *Revue forestière française*, vol.10, p.768-783.
- Debazac, E.F., 1971. Contribution à la connaissance de la répartition et de l'écologie de *Pinus nigra* Arn. dans le sud-est de l'Europe. *Annales des sciences forestières*, vol.28, n°2, p.91-139.
- Delevoy, G., 1949. À propos de la systématique de *Pinus nigra* Arnold. Ministère de l'Agriculture, administration des Eaux et Forêts, travaux – série B, 48 p.
- Dereuddre, J., Gazeau, C., 1992. Les végétaux et les très basses températures, dans : *Les végétaux et le froid*, direction : Côme, D. Hermann. p.107-175.
- Fady, B., Roig, A., Thévenet, J., Turion, N., Gilg, O., Rei, F., Brahic, P., Cambon, D., 2008. Valoriser et conserver le Pin de Salzmann. Compte rendu du programme 2007-2008, 23 p.
- Fady, B., Brahic, P., Cambon, D., Gilg, O., Rei, F., Roig, A., Royer, J., Thévenet, J., Turion, N., 2010. Valoriser et conserver le Pin de Salzmann en France. *Forêt Méditerranéenne*, tome XXXI, n°1, p.3-14.
- FAO, 1963. Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne. UNESCO, p.11-14.
- Fritts, H.C., 1976. *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.
- Génova, M., Cancio, A.F., 1999. Tree rings and climate of *Pinus nigra* subsp. *Salzmannii* in central Spain. *Dendrochronologia*, vol.16-17, pp. 75-85.
- Génova, M., Martinez-Morillas, D., 2002. Estudio dendroecologico de *Pinus nigra* en Checa (Guadalajara). *Ecologia*, vol.16, p.83-95.
- Guiot, J., 1991. Research report, the bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin*, vol.51, 3 p.
- Guiot, J., Gœury, C., 1996. PPPBASE, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. *Dendrochronologia*, vol.14, p.295-300.
- Guiot, J., Nicault, A., 2010. Méthodes de dendroclimatologie à l'échelle continentales : fonctions de réponse et fonctions de transfert, dans : *La dendroécologie*, direction : Payette, S., Filion, L. Presses de l'université de Laval, p.
- Guitard, G., Laumonier, B., Autran, A., Bandet, Y., Berger, G.M., 1998. Carte géologique de la France - Prades. Edition du BRGM, service géologique national, p.68-71.
- Holmes, R.L., 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, vol.43, p.69-78.

- IPCC, 2007. *Climate change 2007 : The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 996 p.
- Isajev, V., Fady, B., Semerci, H., Andonovski, V., 2003. European black pine. Euforgen, 6 p.
- Izard, R., 1986. La gestion actuelle et future de la forêt domaniale de Saint-Guilhem-le-Désert. *Association des amis de Saint-Guilhem-le-Désert*, p.55-56.
- Jimenez, J.F., Sanchez-Gomez, P., Martinez, J.F., Molins, A., Rossello, J.A., 2005. Variabilidad genética de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* en la Region de Murcia mediante microsatélites cloroplásticos. *Anales de Biología*, vol.27, p.105-112.
- Kaennel, M., Schweingruber, F.H., 1995. *Multilingual glossary of dendrochronology*. Paul Haupt. 467 p.
- Kramer P.J., Kozlowski T., 1979. *Physiology of wood plants*. Academic Press, p.258-281.
- Lebourgeois, F., 2000. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France. *Annals of forest science*, vol.57, p.155-164.
- Lebourgeois, F., Granier, A., Bréda, N., 2001. Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en termes de conséquences pour les écosystèmes forestiers. *Annals of forest science*, vol.58, p.733-754.
- Lieutaghi, P., 2004. *Le livre des Arbres, Arbustes et Arbrisseaux*. Actes Sud, p.969-990.
- Linares, J.C., Tiscar, P.A., 2010. Climate change impacts and vulnerability of the southern populations of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Tree Physiology*, vol.30, n° 7, p.795-806.
- Martin-Benito, D., Gea-Izquierdo, G., Del Rio, M., Cañellas, I., 2008. Long-term trends in dominant-height growth of black pine using dynamic models. *Forest Ecology and Management*, vol.256, p.1230-1238.
- Martin-Benito, D., Del Rio, M., Cañellas, I., 2010. Black pine (*Pinus nigra* Arn.) growth divergence along a latitudinal gradient in Western Mediterranean mountains. *Annals of forest science*, vol.67, art.401, 13 p.
- Mitchell, T.D., Hulme, M., New, M., 2002. Climate data for political areas. *Area*, vol.34, p.109-112.
- Neuwirth B., Schweingruber, F.H., Winiger, M., 2007. Spatial patterns of central European pointer year from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, vol.24, p.79-89.
- Nicault, A., Begin, Y., Guiot, J., 2010. Standardisation des séries dendrochronologiques, dans : *La dendroécologie*, direction : Payette, S., Fillion, L. Presses de l'université de Laval, p.199-227.
- Ordóñez J.L., Franco, S., Retana, J., 2004. Limitation of recruitment of *Pinus nigra* in a gradient of post-fire environmental conditions. *Ecoscience*, vol.11, n°3, p.296-304.
- Quézel, P., Barbéro, 1988. Signification phytoécologique et phytosociologique des peuplements naturels de Pin de Salzmann en France. *Ecologia mediterranea*, tome XIV, fascicule 1, p.41-63.
- Quézel, P., Médail, F., 2003. *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*. Collection Environnement, Elsevier, 573 p.
- Rameau, J.C., Chevalier, H., Bartoli, M., 2001. *Cahier d'habitats - tome 1 : habitats forestiers*. La Documentation française, vol.1, p.279-296.
- Rameau, J.C., Mansion, D., Dumé, G., Gauberville, C., 2008. *Flore forestière française, guide écologique illustré : Région méditerranéenne*. Dijon : Institut pour le développement forestier, p.341.
- Regato-Parajes, P., Escudero, A., 1989. Caracterización fitoecológica de las comunidades de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* en los afloramientos rocosos del sistema ibérico meridional. *Botanica Complutensis*, vol.15, p.149-161.
- Regato-Parajes, P., Elena-Rossello, R., Sanchez Palomares, O., 1991. Estudio autoecológico comparativo de *Pinus nigra* Arn. subespecie *salzmannii* de la península ibérica y otras subespecies de la región circunmediterránea. 19° congres internacional IUFRO, p.49-59.
- Regato-Parajes, P., Gamisans, J., Gruber, M., 1995. A syntaxonomical study of *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* forests in Iberian peninsula. *Phytocoenologia*, vol.25, n° 4, p.561-578.
- Regato-Parajes, P., Elena-Rossello, R., 1995. Natural black pine (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii*) forests of the iberican eastern mountains: development of the phytoecological basis for their site evaluation. *Annales des sciences forestières*, vol.52, p. 589-606.

- Rey, P., 1954. Le Pin laricio de Salzman en Andorre. *Bulletin de la société d'histoire naturelle de Toulouse*, tome 89, fascicule 3 et 4, p.410-413.
- Schaefer, L., 1952. Saint-Guilhem-le-Désert (Hérault), localité entomologique remarquable. *L'entomologiste*, vol.8, n°5-6, p.136-150.
- Schaefer, L., 1961. La biocénose coléoptérologique du pin de Salzman dans l'Hérault. *Annales de la société d'horticulture et d'histoire naturelle de l'Hérault*, fascicule 3, p.157-179.
- Tanghe, C., 1991. *Écologie et croissance du pin de Salzman en France*. Mémoire de 3^e année ENITEF. Cemagref, 85 p.
- Tiscar-Oliver, P.A., 2002. Capacidad reproductiva de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* en relacion con la edad de la planta madre. *Sistemas y Recursos Forestales*, vol.11, n° 2, p.357-371.
- Tiscar-Oliver, P.A., 2003. Condicionantes y limitaciones de la regeneracion natural en un pinar oromediterraneo de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Sistemas y Recursos Forestales*, vol.12, n°2, p.55-64.
- Tiscar-Oliver, P.A., Ruiz, M.A., 2005. Relacion entre la regeneracion y la apertura del dosel forestal en *Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco. IV congrès forestier espagnol, Zaragoza, 26-30 septembre, 7 p.
- Tiscar-Oliver, P.A., 2007. Dinamica de regeneracion de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii* al sur de su area de distribucion: etapas, procesos y factores implicados. *Sistemas y Recursos Forestales*, vol.16, n°2, p.124-135.
- Vernet, J.L., Meter, A., Zéraïa, L., 2005. Premières datation de feux holocènes dans les monts de Saint-Guilhem-le-Désert (Hérault, France), contribution à l'histoire de la forêt relique de *Pinus nigra* Arnold ssp. *salzmannii* (Dun.) Franco. *Géosciences*, vol.337, p.533-537.
- Wieser, G., 1997. Carbon dioxide gas exchange of cembra pine (*Pinus cembra*) at the alpine timberline during winter. *Tree Physiology*, vol.17, p.473-477.

Ressources numériques :

- BRGM – Bureau de recherches géologiques et minières. Dernière consultation en juin 2011.
<http://www.brgm.fr/>
- CGIAR – Consortium for spatial information. Dernière consultation en mars 2011.
<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>
- EUFORGEN – European forest genetic resources program. Dernière consultation en juin 2011.
<http://www.euforgen.org/>
- Géoportail – base de données cartographiques en ligne. Dernière consultation en juillet 2011.
<http://www.geoportail.fr/>
- IMEP – Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie. Dernière consultation en juillet 2011.
<http://www.imep-cnrs.com/>
- Météo-France – Réseau des stations météorologiques en service. Dernière consultation en mars 2011.
<http://climatheque.meteo.fr/>
- The Ultimate Tree-Ring page – Sites de référence en dendrochronologie par Henri D. Grissino-Mayer. Dernière consultation en juillet 2011.
<http://web.utk.edu/~grissino/>
- Tyndall Centre – Climate change research. Dernière consultation en avril 2011.
<http://www.tyndall.ac.uk/>
- WorldClim – World climate data. Dernière consultation en mars 2011.
<http://worldclim.org/>

Liste des contacts

- **Institut méditerranéen d'écologie et de paléoécologie**

IMEP - St Jérôme

Av. Escadrille Normandie-Niemen - Boite 441
F 13397 Marseille cedex 20
Tel : 04 91 28 85 27
Fax : 04 91 28 86 68
<http://www.imep-cnrs.com>

IMEP - Arbois

Bâtiment Villemin
Europole de l'Arbois - BP 80
F 13545 Aix-en-Provence cedex 04

Frédéric Médail

Responsable Département I : « Paléoenvironnements et biogéographie évolutive »
Email : f.medail@univ-cezanne.fr
Tél : 04 42 90 84 06
Fax: 04 42 90 84 48

Frédéric Guibal

Chargé de recherches
Email : frederic.guibal@univ-cezanne.fr
Tél : 04 42 90 84 07

Maryse Alvitre

Technicienne du pôle dendrochronologie de l'IMEP
Email : maryse.alvitre@univ-cezanne.fr
Tél : 04 42 90 84 04

- **Institut national de la recherche agronomique**

Unité des forêts méditerranéennes

UR0629 URFM Écologie des Forêts Méditerranéennes
84914 AVIGNON
Tél : 04 32 72 29 00
<http://www.avignon.inra.fr/URFM>

Bruno Fady

Directeur de recherches
Email : fady@avignon.inra.fr
Tél : 04 32 72 29 08 / 04 42 90 84 71

Norbert Turion

Chef d'équipe technique

Email : turion@avignon.inra.fr

Tél : 04.32.72.29.22

- **Office national des forêts**

Agence départementale Hérault – Gard

505 rue de la Croix Verte

Parc Euromédecine - BP 74208

34094 Montpellier cedex 05

Tél : 04 67 04 66 99

Fax : 04 67 04 66 88

Daniel Cambon

Responsable biodiversité

ONF Direction territoriale Méditerranée

Email : daniel.cambon@onf.fr

Tél : 04 67 04 66 82

Bernard Latour

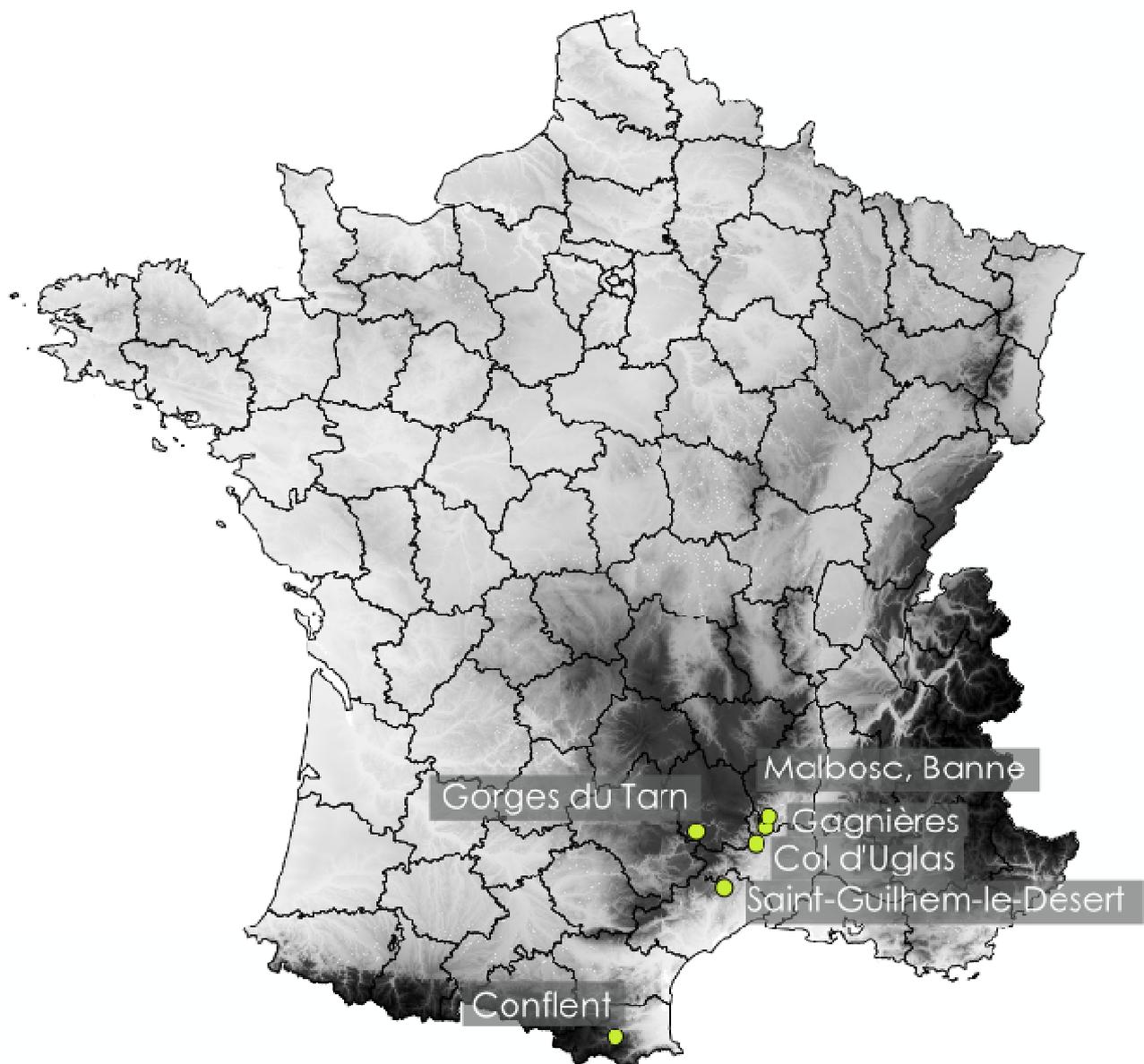
Technicien ONF, unité territoriale de Prades

Email : bernard.latour@onf.fr

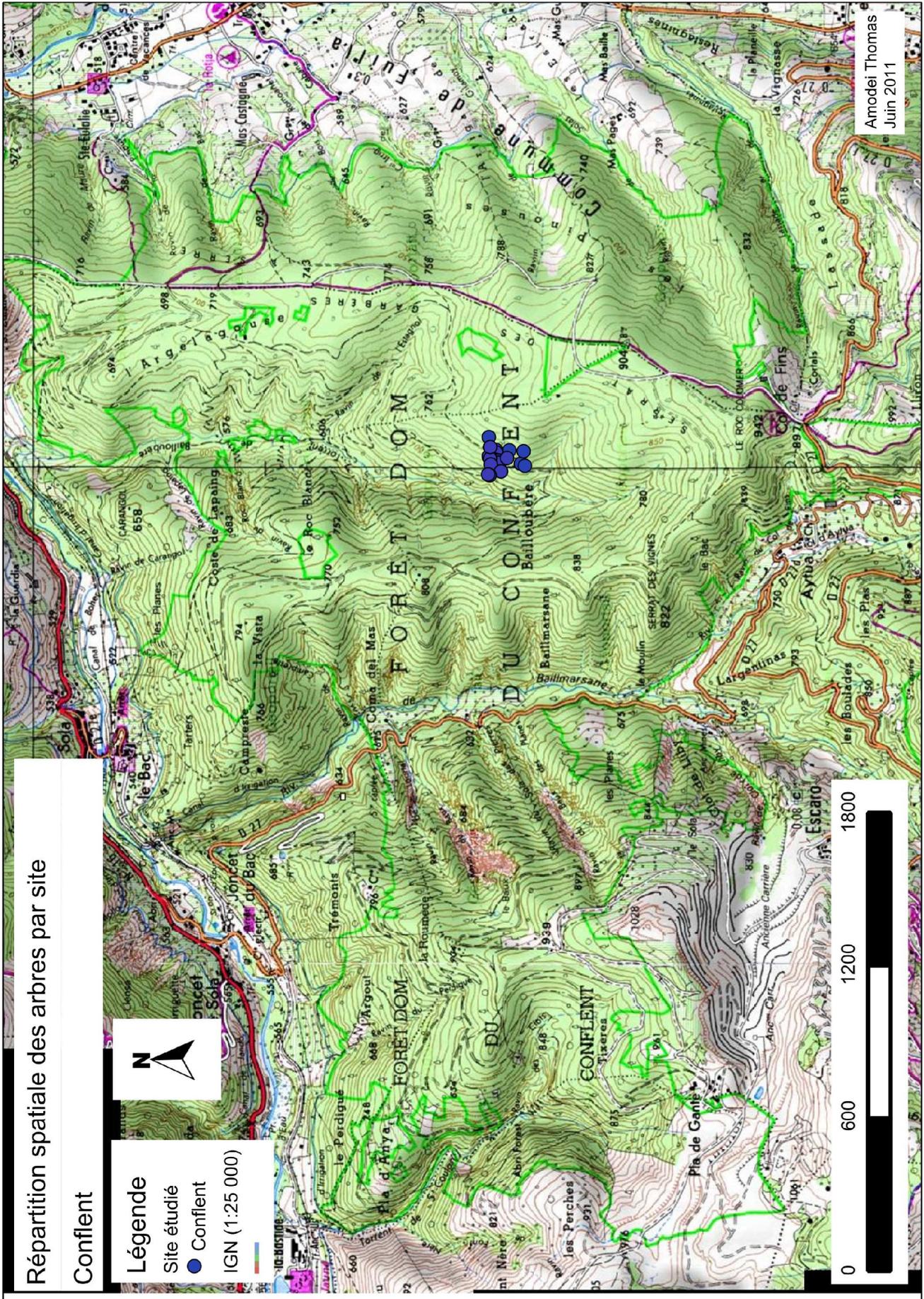
Table des annexes

| | |
|---|--------|
| Annexe 1 - Distribution des principaux peuplements de pin de Salzmann en France | - 66 - |
| Annexe 2 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent (IGN) | - 67 - |
| Annexe 3 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent (BRGM) | - 68 - |
| Annexe 4 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique de Prades | - 69 - |
| Annexe 5 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent (Cassini) | - 70 - |
| Annexe 6 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn (IGN) | - 71 - |
| Annexe 7 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn (BRGM) | - 72 - |
| Annexe 8 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique de Florac | - 73 - |
| Annexe 9 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn (Cassini) | - 74 - |
| Annexe 10 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem (IGN) | - 75 - |
| Annexe 11 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem (BRGM) | - 76 - |
| Annexe 12 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique du Caylar | - 77 - |
| Annexe 13 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem (Cassini) | - 78 - |
| Annexe 14 - Détail des stations météorologiques utilisées sur les trois sites d'étude | - 79 - |
| Annexe 15 - Synthèse des tests de l'ANOVA et de Kruskal-Wallis pour les études intersites et intra-site | - 79 - |
| Annexe 16 - Chronologies standardisées sur les sites du Conflent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem-le-Désert et nombre de carottes analysées en fonction du temps | - 80 - |
| Annexe 17 - Chronologies standardisées sur les sites de Fond-de-Combe, de l'Ajouradou et du Roc-de-la-Jarre et nombre de carottes analysées en fonction du temps | - 81 - |
| Annexe 18 - Caractéristiques des arbres échantillonnés dans le Conflent (CO), les gorges du Tarn (GT), le Roc-de-la-Jarre (SGJ), l'Ajouradou (SGA), le Fond-de-Combe (SGF) | - 82 - |
| Annexe 19 - Résultat du calcul des fonctions de réponse pour l'étude intersites (a) et pour l'étude intra-site (b) utilisant comme régresseurs les températures minimales | - 84 - |
| Annexe 20 - Détail des indices de Cropper pour les années caractéristiques intersites a) et intra-site b) | - 85 - |
| Annexe 21 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre), des gorges du Tarn et du Conflent et anomalies de températures de janvier, février, mars (carrés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps | - 86 - |
| Annexe 22 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites du Roc-de-la-Jarre, de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe et anomalies de précipitations d'avril, mai, juin, juillet (triangles) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps | - 87 - |
| Annexe 23 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites du Roc-de-la-Jarre, de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe et anomalies de températures d'avril, mai, juin, juillet (carrés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps | - 88 - |

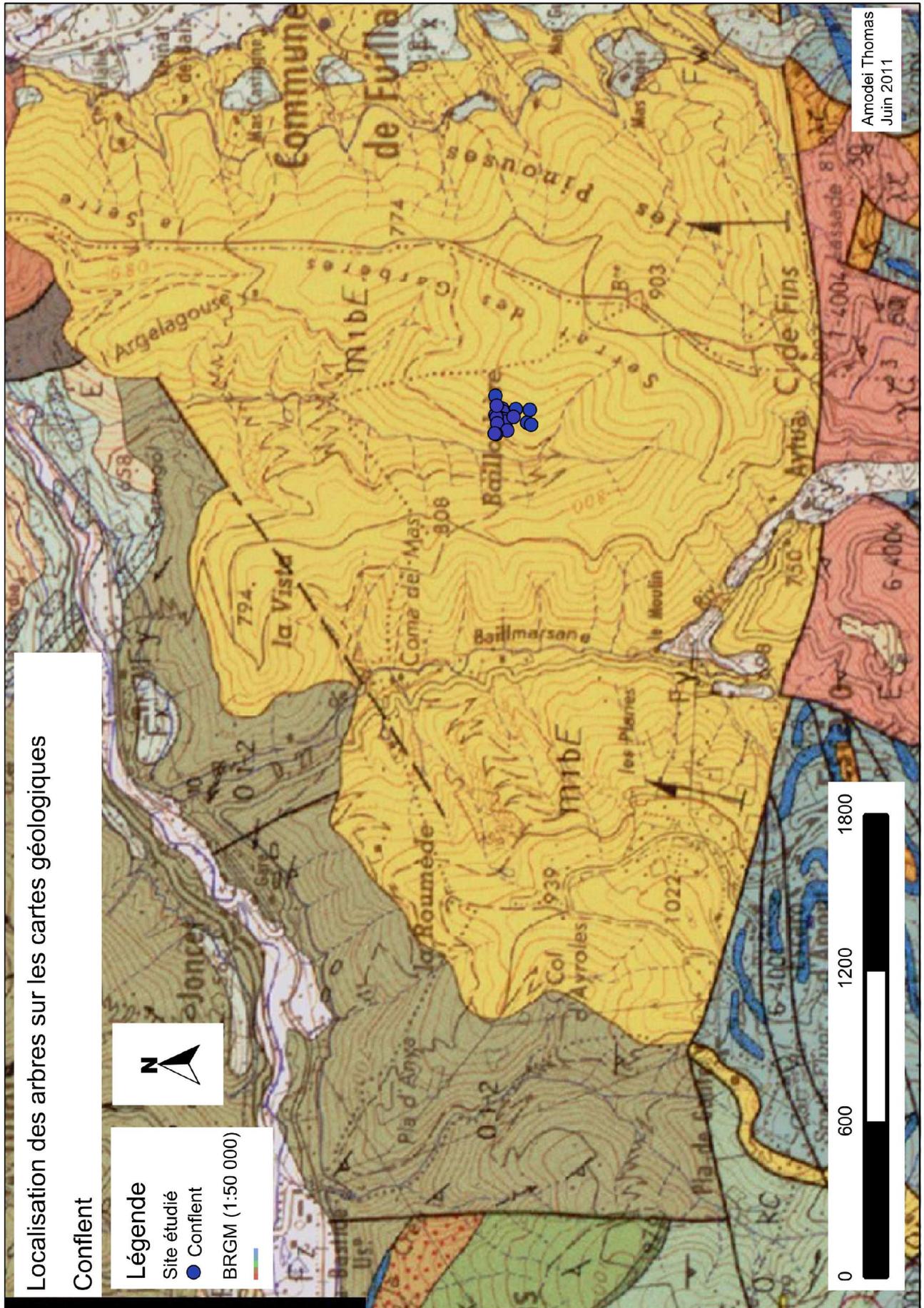
**Annexe 1 - Distribution des principaux peuplements de pin de Salzman en France.
Fond de carte topographique au pas de 250 m. Source : Amodei et IGN.**



Annexe 2 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent. Fond IGN 1 : 25 000. Source : Amodei.



Annexe 3 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent. Fond de carte géologique 1 : 50 000. Source : Amodei.



**Annexe 4 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique de Prades (1 :50 000).
Source : Guitard et al. 1998**

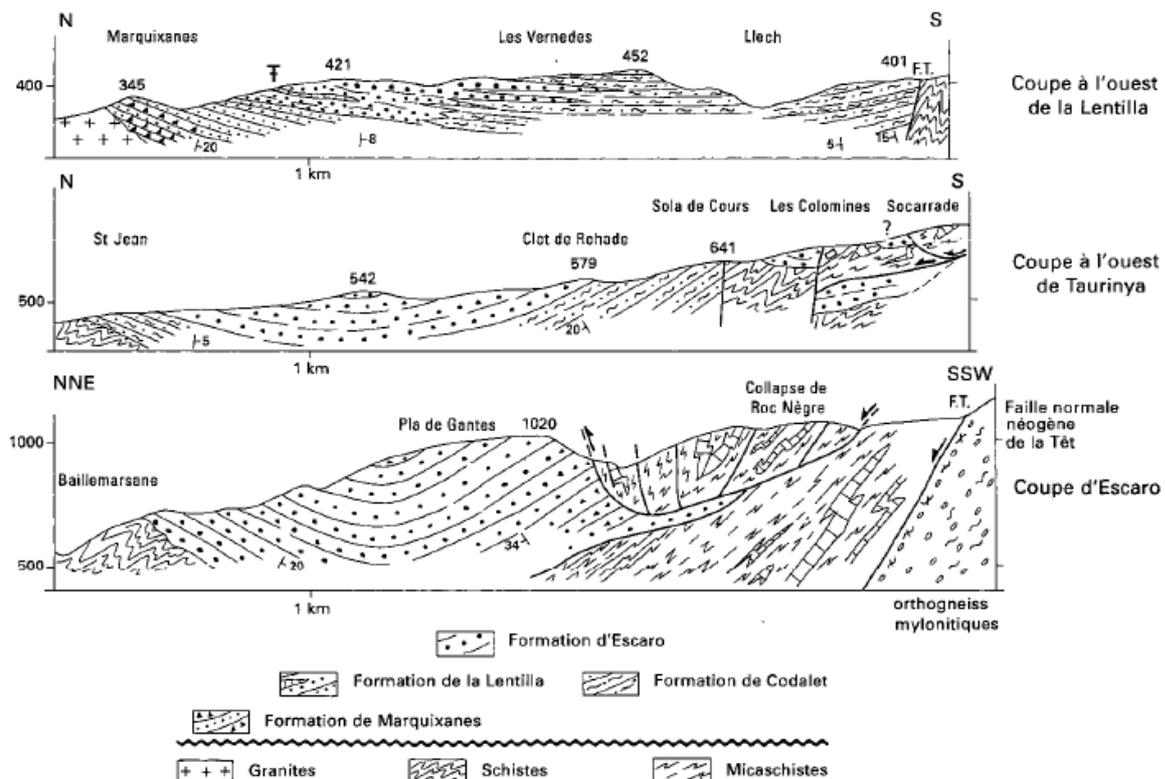
m1bE. Formation d'Escaro. Miocène inférieur p.p. (500-600 m).

Dans la partie occidentale du bassin, entre Prades et Escaro, cette formation de teinte générale jaunâtre est constituée par une alternance de sables grossiers quartzo-feldspathiques très mal triés et de niveaux à gros blocs, essentiellement de gneiss, de dimension métrique. L'érosion y donne des « bad-lands » typiques. Les faciès essentiels sont des décharges torrentielles hétérométriques à blocs restés anguleux et très frais.

La prédominance des gneiss indique le massif du Canigou et de la Carança comme origine des dépôts. Cependant, entre Corneilla-de-Conflent et Taurinya on peut trouver des micaschistes, dolomies ankéritiques, calcaires dévoniens provenant des secteurs de Canaveilles, Jujols et Villefranche-de-Conflent. C'est dans cette zone qu'O. Mengel avait signalé des blocs à sections d'hippurites ; ils ont été retrouvés mais les affleurements de Crétacé supérieur dont ils proviennent demeurent inconnus. A la base, près de Sahorre, dans le lit de la Rotja, on observe des sables arkosiques grossiers, avec une alternance de niveaux rougeâtres et verdâtres, qui rappellent le faciès de la Formation de Marquixanes.

Sur sa bordure nord, de l'est à l'ouest on peut observer la concordance des dépôts grossiers à blocs de gneiss sur la Formation de Codalet, puis sur le Dévonien ou les schistes de Jujols, mais avec des pendages de 30 à 40° vers le sud-est subparallèles à la pente du substrat, qui suggèrent un basculement vers le sud plus ou moins synchrone des dépôts, d'origine tectonique.

La bordure sud a un fort pendage vers le nord. Elle est très complexe par ses jeux tectoniques et montre de nombreuses écaïlles du socle du Canigou embouties dans les dépôts (cf. infra et « Évolution tectonique »). L'épaisseur peut être estimée au minimum à 500 m au nord de Clara et 600 m au nord d'Escaro.



**Fig. 10 - Trois coupes à travers le fossé lacustre-fluvial miocène du Conflent
(d'après Calvet, 1994-1997, complété sur la coupe la plus occidentale)**

Annexe 5 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans le Conflent. Fond de carte de Cassini. Source : Amodei.

Localisation des arbres sur les cartes de Cassini

Conflent

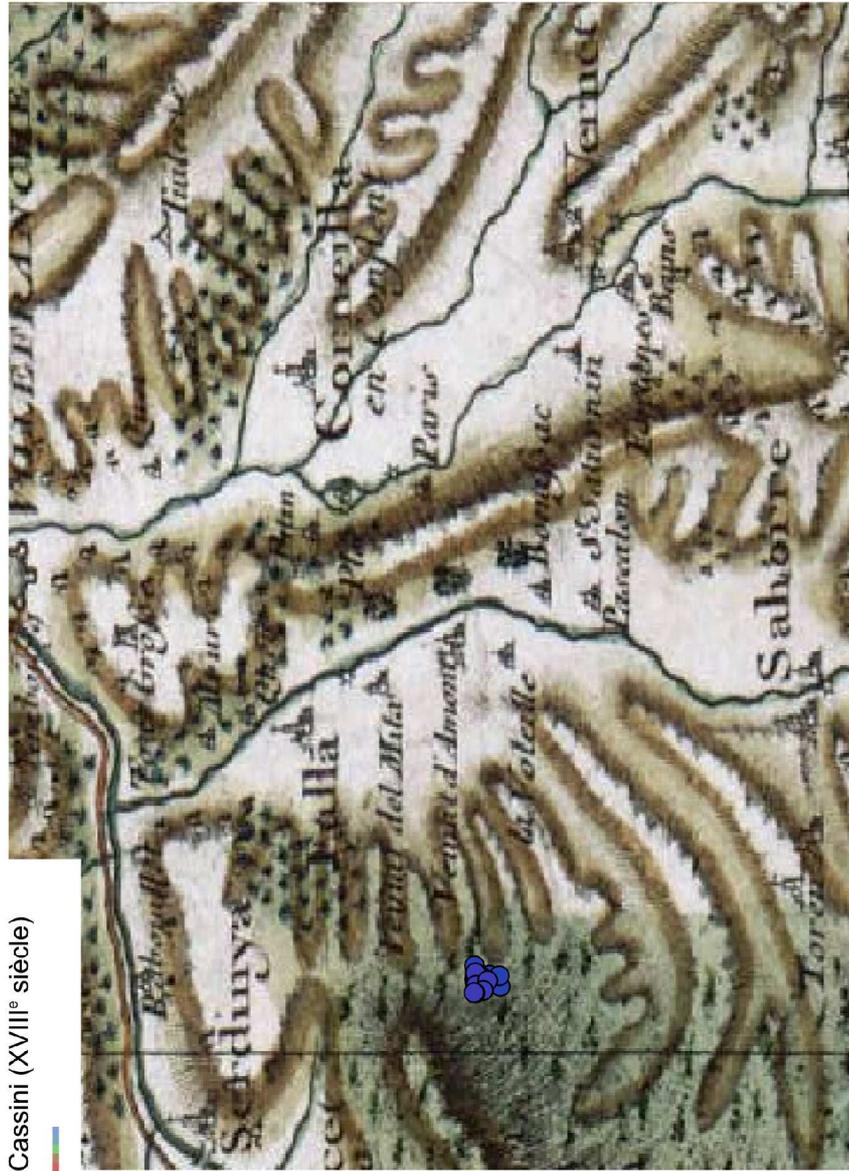
Légende

Site étudié

● Conflent



Cassini (XVIII^e siècle)



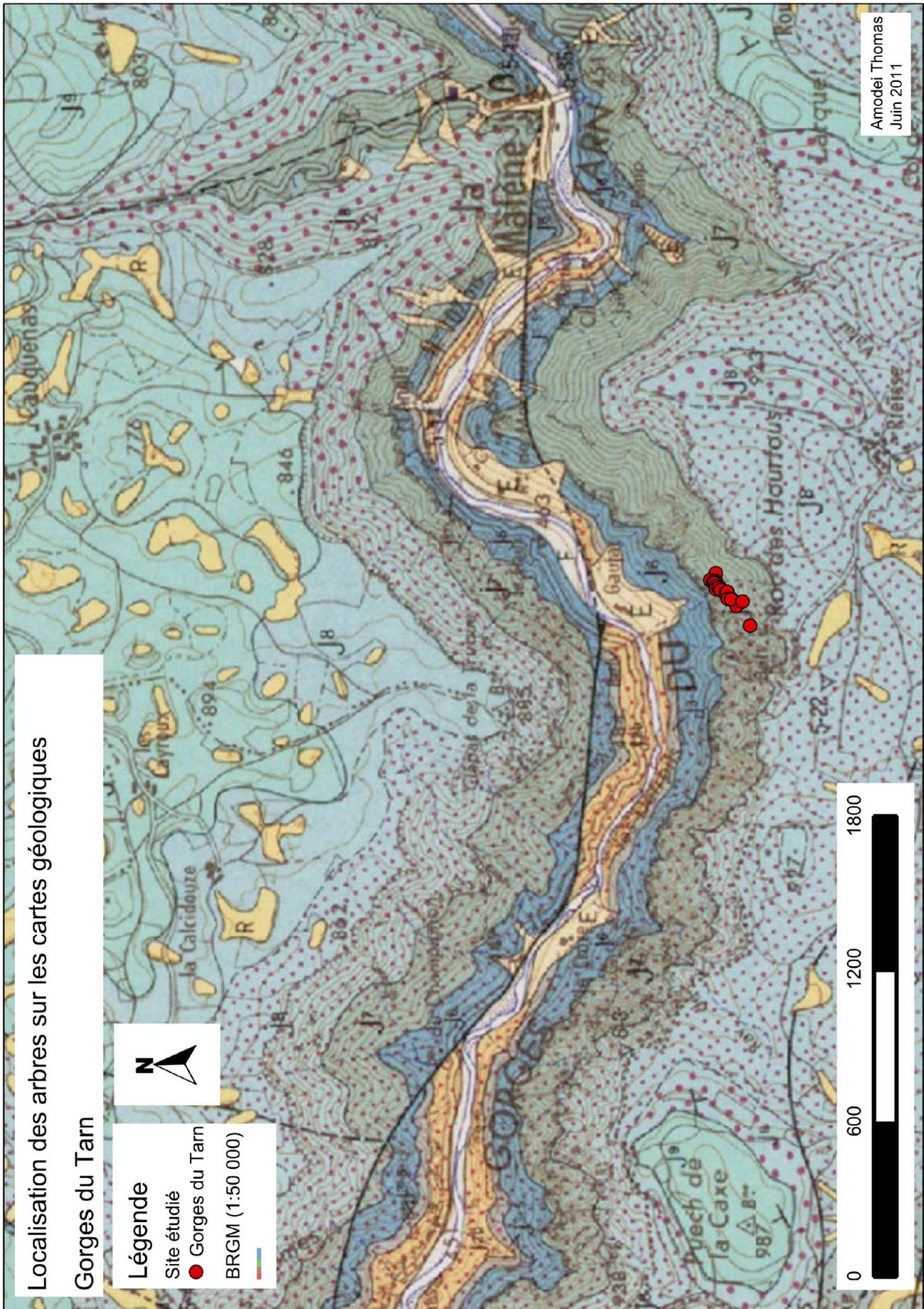
Amodei Thomas
Juin 2011

Légende partielle des cartes de Cassini

Reliefs et végétation

| | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|
| | Bois ou forêt | | Marais |
| | Forêt de sapins | | Sables |
| | Bruyère ou lande | | Flots qui représentent les vagues de la mer |
| | Prés | | Dunes |
| | Vignes | | Montagnes |
| | Vallon avec ruisseau dans le fond | | Hâchures représentant les côtes et les montagnes |

**Annexe 7 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn.
Fond de carte géologique 1 : 50 000. Source : Amedei.**



**Annexe 8 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique de Florac (1 :50 000).
Source : Gèze et al. 1978.**

j7. Kimméridgien inférieur (= Séquanien) (80 à 160 m).

Calcaires blancs massifs et marno-calcaires en plaquettes, dolomités seulement dans l'ouest du territoire de la feuille. Pas de fossiles significatifs décrits. La notation j 6 - 7 est attribuée à une formation indifférenciée, considérée comme Rauracien-Séquanien, qui se présente sous les faciès de calcaires en plaquettes extrêmement monotones dans le centre-nord du causse de Sauveterre, comme calcaire irrégulièrement dolomitisé, puis comme dolomie franche plus à l'ouest.

j8. Kimméridgien supérieur (150 à 250 m).

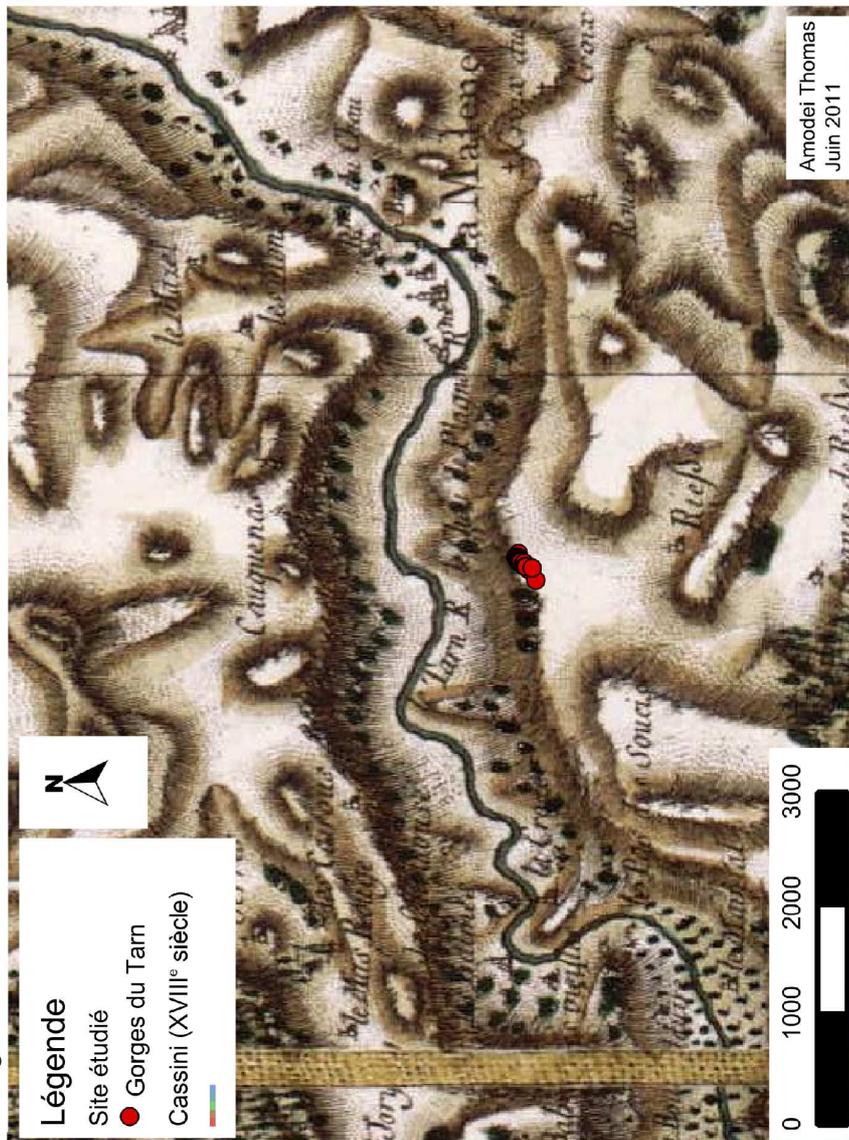
Calcaires et dolomies groupés en une seule unité dans l'ouest de la feuille où dominant les faciès dolomitiques, mais où de gros bancs calcaires peuvent cependant terminer la formation. Ceux-ci se retrouvent également, irrégulièrement dolomités dans le sud (causse Méjan). En l'absence de faune déterminable, leur attribution au Kimméridgien plutôt qu'au Portlandien est assez conventionnelle. Dans la plus grande partie de la feuille, la distinction suivante a été possible :

- **j8a. Kimméridgien supérieur (partie inférieure) (50 à 100 m).** Calcaires blancs en gros bancs ou en plaquettes sublithographiques, à tubes de Serpules, Lamellibranches, Brachiopodes dont *Zeilleria humeralis*, *Ataxioceras* sp. Lorsqu'il existe, le faciès en gros bancs est plus fréquent à la base et a tendance à se disjoindre en blocs parallélépipédiques analogues à ceux qui sont typiques au sud (feuille Meyrueis) sous le nom de boulets ou boulettes.
- **j8b. Kimméridgien supérieur (partie supérieure) (100 à 150 m).** Dolomies grises donnant des aspects ruiniformes un peu analogues à ceux du Bathonien supérieur, mais où le litage se devine habituellement mieux. Des passées calcaires n'y sont pas exceptionnelles; le caractère récital est souvent évident.

**Annexe 9 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés dans les gorges du Tarn.
Fond de carte de Cassini. Source : Amodei.**

Localisation des arbres sur les cartes de Cassini

Gorges du Tarn

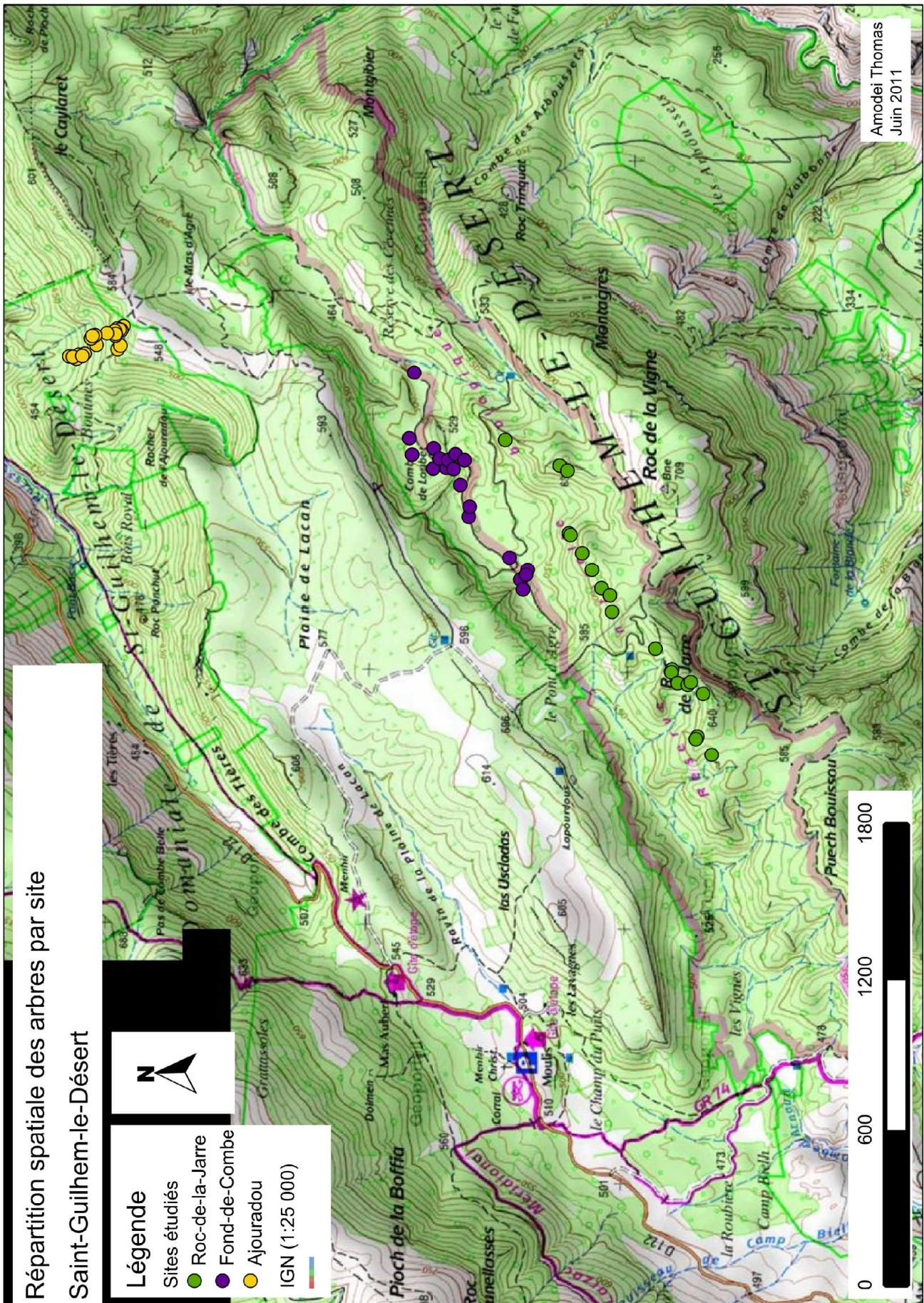


Légende partielle des cartes de Cassini

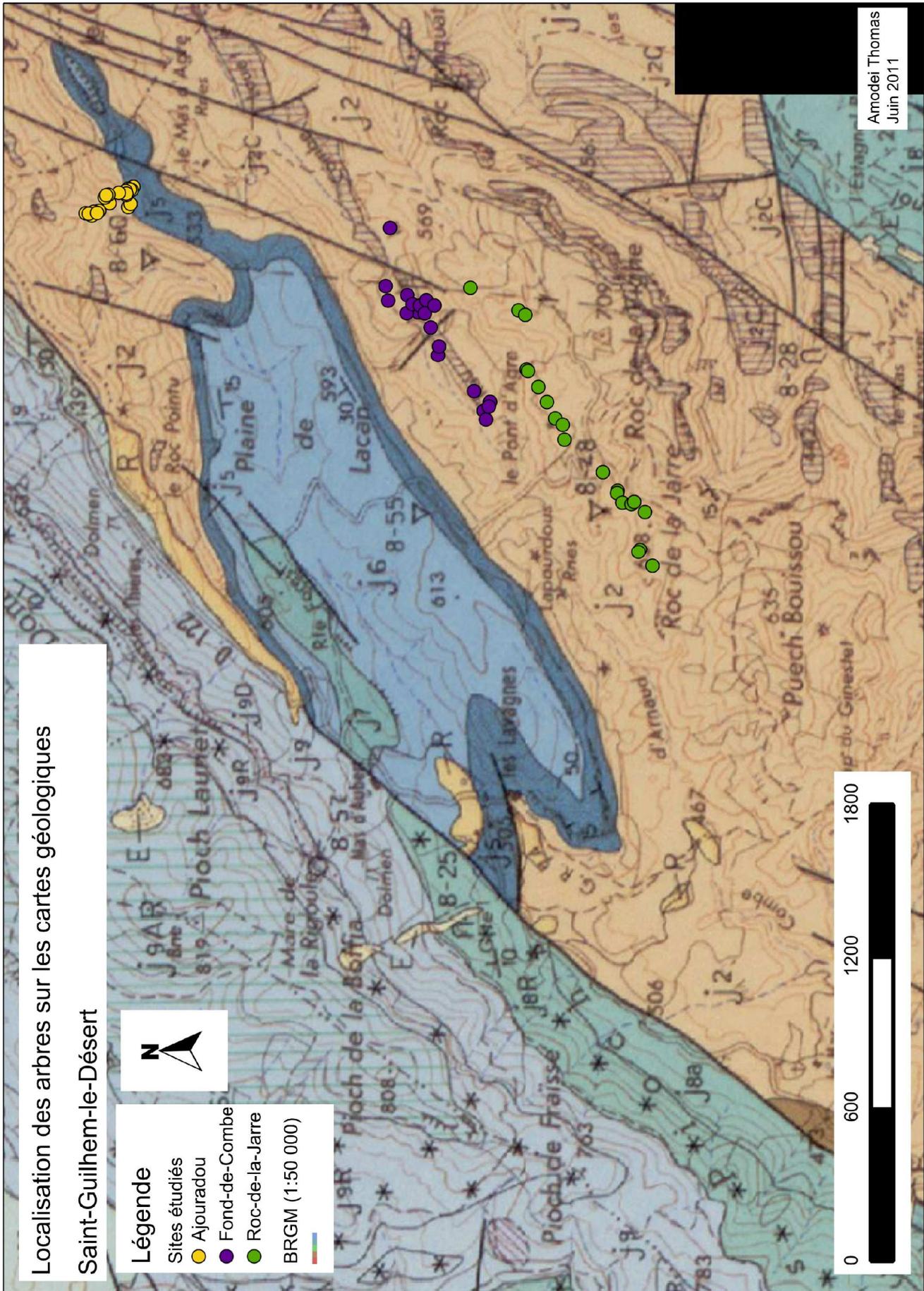
Reliefs et végétation

| | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|
| | Bois ou forêt | | Marais |
| | Forêt de sapins | | Sables |
| | Bruyère ou lande | | Flots qui représentent les vagues de la mer |
| | Prés | | Dunes |
| | Vignes | | Montagnes |
| | Vallon avec ruisseau dans le fond | | Hâchures représentant les côtes et les montagnes |

Annexe 10 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem-le-Désert.
Fond de carte IGN 1 : 25 000. Source : Amodei.



Annexe 11 - Répartition spatiale des arbres échantillonnés à Saint-Guilhem-le-Désert.
Fond de carte géologique 1 : 50 000. Source : Amodei.



Annexe 12 - Extrait de la notice explicative de la carte géologique du Caylar. Source : Alabouvette *et al.* 1988.

j2, j2b, j 1-2. Bathonien. Dolomies ruiniformes. Ensemble massif et homogène de dolomie grenue à patine gris sombre et altération caractéristique en pinacles et reliefs ruiniformes.

La structure est fréquemment vacuolaire, résultat de la dissolution des reliquats de calcite, et conserve parfois des fantômes d'oolithes ou gravelles, témoins du sédiment originel calcaire dolomitisé secondairement. Dans les régions voisines où les faciès calcaires sont conservés, on peut observer que la dolomitisation envahit sélectivement les faciès péri récifaux.

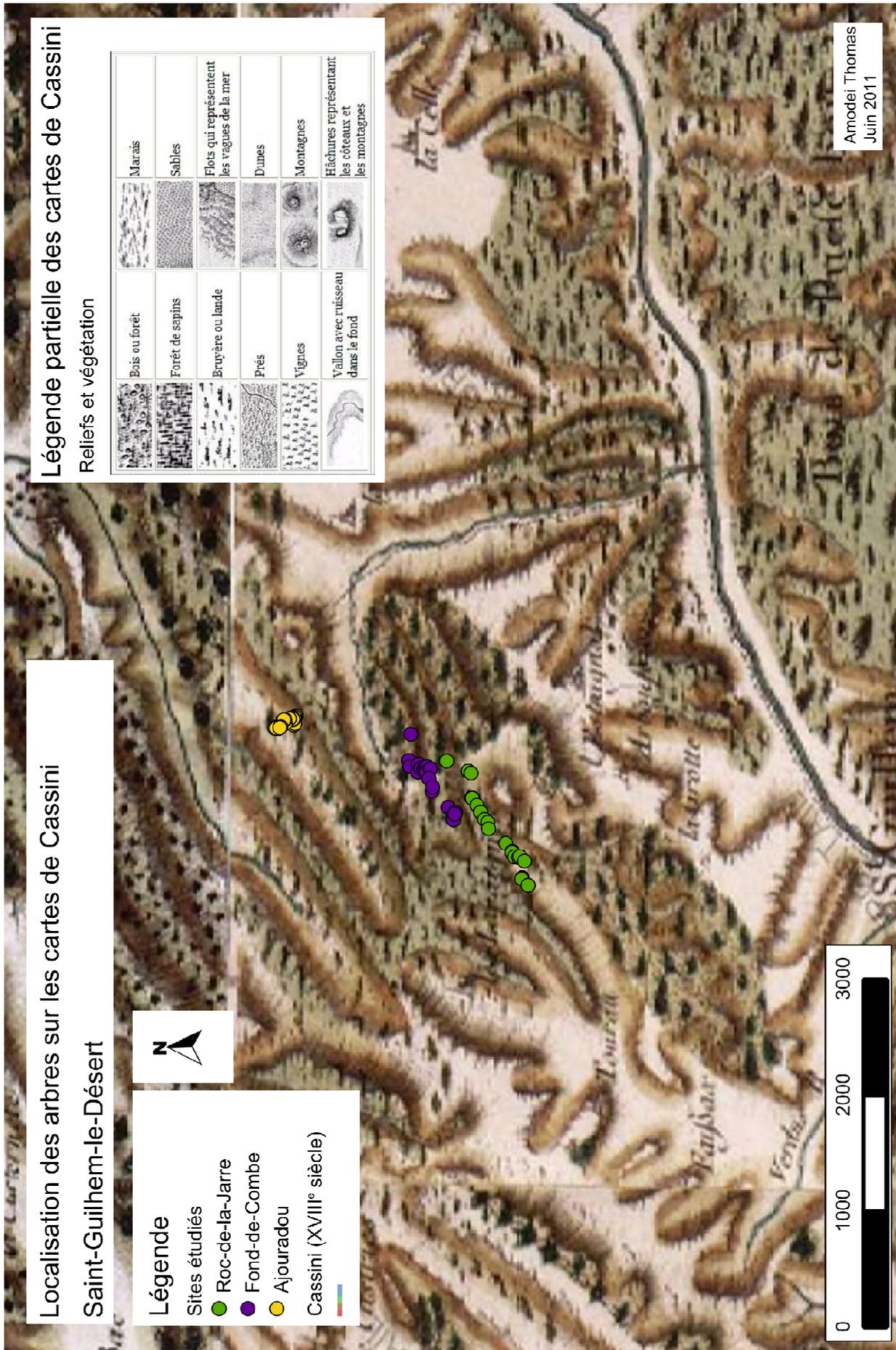
En dehors des zones où les faciès calcaires respectés par la dolomitisation sont suffisamment développés pour être cartographiés, peuvent subsister cependant, notamment à l'aplomb de Saint-Etienne-de-Gourgas ou dans la vallée de la Vis, des îlots de dimensions variables à faciès identiques, sublithographiques graveleux ou oolithiques. Devenant friable par altération, la dolomie se décompose alors en sable dolomitique qui s'accumule dans les dépressions au pied des reliefs résiduels. On a vu que dans l'ouest de la feuille, la dolomie ruiniforme succède à un ensemble attribué au Bathonien inférieur et au Bajocien supérieur et peut donc être rapportée dans ce secteur au Bathonien supérieur.

Plus à l'Est, ces horizons inférieurs ne pouvant plus être distingués, le faciès dolomitique succède généralement aux calcaires à *Cancellophycus* de l'Aalénien (avec lacune probable d'une partie au moins du Bajocien) et est alors attribué au Bajocien supérieur et au Bathonien. En fait, les très rares Ammonites livrées par ces niveaux au nord-est de la feuille n'ont jusqu'à présent permis d'identifier que le Bathonien supérieur et laissent planer une grande incertitude sur la limite inférieure de l'ensemble dolomitique. En ce qui concerne la limite supérieure, le Callovien inférieur et moyen est connu plus à l'Est (1/50 000 le Vigan), représenté par un mince horizon glauconieux ou ferrugineux au sommet de la dolomie ruiniforme, avant de prendre, au-delà de Saint-Hippolyte-du-Fort, un notable développement.

Dans la vallée de la Vis, un mince "cordon" glauconieux représente peut-être l'équivalent de ces niveaux, qui ne seraient pas représentés dans tout l'ouest de la feuille et paraissent devoir être exclus de l'ensemble dolomitique. L'ensemble varie considérablement en puissance, la série la plus réduite se rencontrant sur une étroite bande NE-SW reliant Fozières à Montdardier, avec des valeurs de l'ordre de 50 m pouvant se réduire à 25- 30 m dans la région de Rogues.

Vers le nord-ouest, les épaisseurs s'accroissent régulièrement jusqu'à 80-100 m en amont de la Vis et dans le Larzac-ouest. Vers le sud-est, un accroissement très rapide s'observe au passage de la grande faille des Cévennes avec des puissances qui peuvent atteindre 300 m dans le Causse de la Selle et au moins 200 m dans les Monts de Saint-Guilhem. Cette distribution des variations d'épaisseur traduit l'existence d'un axe positif, manifestation, à cette époque, du *seuil caussenard*. A un bombement général du substratum anté-Bathonien s'ajoute, sur l'axe à sédimentation réduite, une série de rejeux en failles normales contrôlant de petits horsts qui amènent le Bathonien, avec localement de notables discordances angulaires, au contact des diverses assises du Lias ou même du Trias. Ces accidents, qui n'affectent pas ou très faiblement les assises supérieures au Bathonien, décalent localement de plus de 150 m les assises du Lias et peuvent être rapportés à une *phase tectonique antébatlionienne*.

Dans la région située au sud de la Vaquerie, à ces manifestations s'ajoutent les phénomènes de glissements synsédimentaires contemporains des couches à *Cancellophycus* et qui peuvent participer d'une même phase de tectonique en distension.



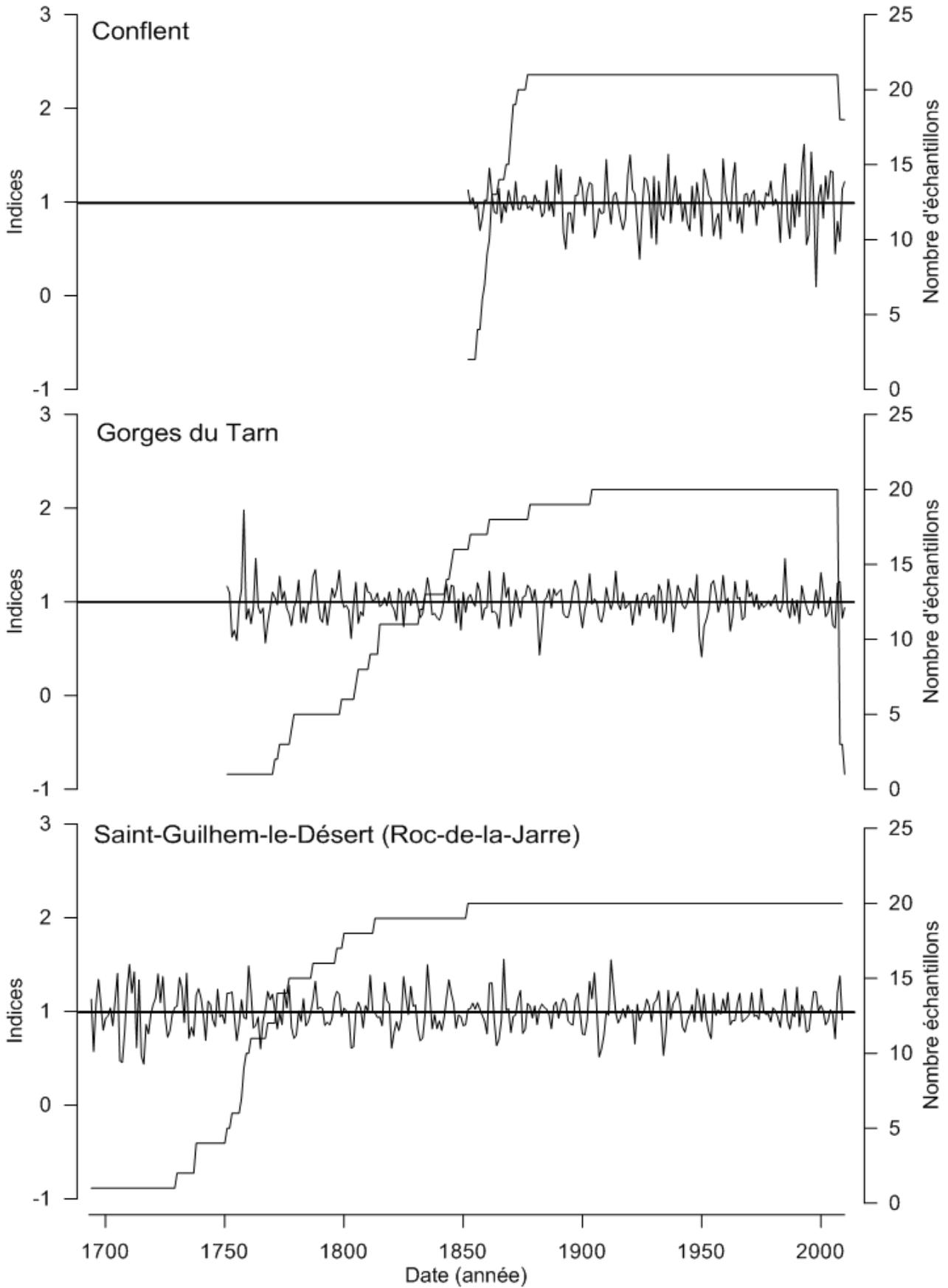
Annexe 14 - Détail des stations météorologiques utilisées sur les trois sites d'étude. Source : Amodei.

| Site d'étude | Département | Nom de la station | Numéro de la station | Distance au site d'étude (km) | Chronologie températures | Chronologie précipitations |
|-------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Saint-Guilhem-le-Désert | Hérault | Aniane | 34010001 (4) | 10 | 1966-2010 | 1966-2010 |
| | Hérault | Lodève | 34142001 (4) | 20 | 1980-2010 | 1980-2010 |
| | Hérault | Pujols | 34212001 (4) | 20 | 1966-2010 | 1966-2010 |
| | Hérault | Saint Martin de Londres | 34239002 (2) | 14 | 1966-2010 | 1966-2010 |
| Conflent | Pyrénées-Orientales | Vernet les Bains | 66222003 (2) | 5 | 1967-2010 | 1875-2010 |
| | Pyrénées-Orientales | Fillols | - | 5 | 1947-2005 | 1947-2005 |
| | Pyrénées-Orientales | Olette | - | 6 | 1983-2009 | 1895-2009 |
| gorges du Tarn | Lozère | Massegros | 48094001 (2) | 10 | 1953-2010 | 1953-2010 |
| | Lozère | Florac | 48061002 (4) | 35 | 1951-2010 | 1923-2010 |
| | Lozère | Hure la Parade | 48074003 (4) | 10 | 1999-2010 | 1999-2010 |

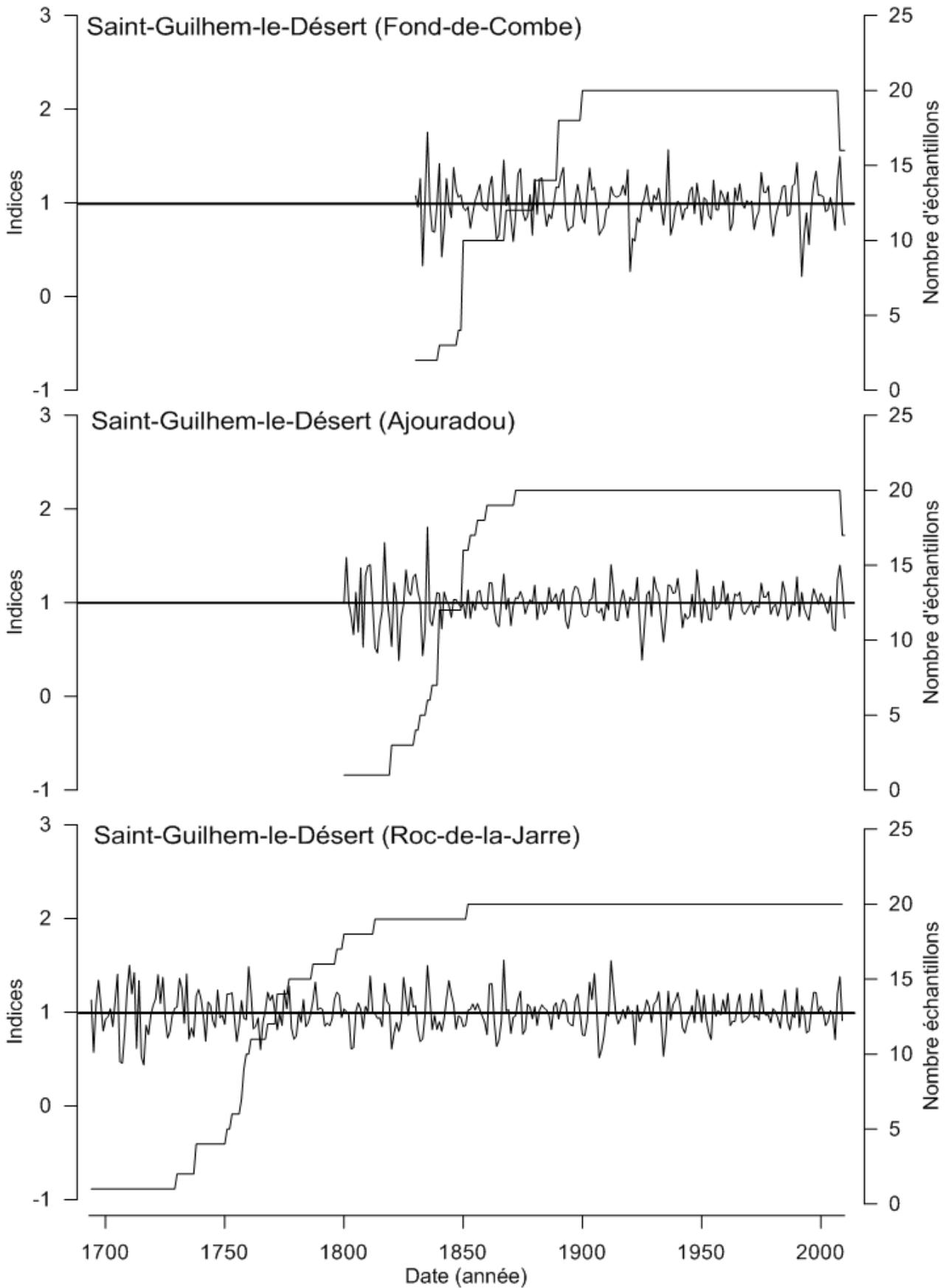
Annexe 15 - Synthèse des tests de l'ANOVA et de Kruskal-Wallis pour les études intersites et intra-site. Moyenne : moyenne inter-population du coefficient de détermination issu du calcul des fonctions de réponse individuelle sur les températures maximales. p : degré de signification. F : rapport entre variance intra et variance inter Coef. var. : coefficient de variation calculé comme la racine de la variance ramené à la moyenne inter-population. Source : Amodei.

| Test statistique | Paramètre | Etude Intersites | Etude Intra-site |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Moyenne | 0,450 | 0,453 |
| ANOVA | p | 4,4E-06 | 0,034 |
| | Variance inter | 0,0315 | 0,0122 |
| | Variance intra | 0,0020 | 0,0034 |
| | F | 15,433 | 3,586 |
| | Coef. var. inter | 39.5% | 24.4% |
| | Coef. var. intra | 10.1% | 12.9% |
| Kruskal-Wallis | p | 0 | 0,055 |

Annexe 16 - Chronologies standardisées sur les sites de Conflent, des gorges du Tarn et de Saint-Guilhem-le-Désert et nombre de carottes analysées en fonction du temps.
Source : Amodei.



Annexe 17 - Chronologies standardisées sur les sites de Fond-de-Combe, de l'Ajouradou et du Roc-de-la-Jarre et nombre de carottes analysées en fonction du temps. Source : Amodei.



Annexe 18 - Caractéristiques des arbres échantillonnés dans le Conflent (CO), les gorges du Tarn (GT), le Roc-de-la-Jarre (SGJ), l'Ajouradou (SGA), le Fond-de-Combe (SGF). MS : *mean sensitivity*. Autocorr. : autocorrélation d'ordre 1. LC_{moy} 1878-2000 : largeur moyenne des cernes sur la période commune 1878-2000.

| Site | Identifiant arbre | Altitude (m) | Pente (°) | Age | MS | Autocorr. | LC _{moy} 1878-2000 |
|------|-------------------|--------------|-----------|-----|------|-----------|-----------------------------|
| CO | Conf769 | 766 | 20.3 | 159 | 0.40 | 0.87 | 92 |
| CO | Conf156 | 753 | 21.0 | 158 | 0.39 | 0.78 | 118 |
| CO | Conf158 | 747 | 20.9 | 160 | 0.31 | 0.77 | 82 |
| CO | Conf159 | 747 | 20.9 | 159 | 0.32 | 0.94 | 60 |
| CO | Conf639 | 747 | 20.9 | 151 | 0.39 | 0.79 | 78 |
| CO | Conf640 | 747 | 20.9 | 159 | 0.41 | 0.43 | 110 |
| CO | Conf642 | 737 | 21.2 | 166 | 0.39 | 0.79 | 113 |
| CO | Conf649 | 737 | 21.2 | 166 | 0.35 | 0.90 | 104 |
| CO | Conf651 | 737 | 21.2 | 161 | 0.40 | 0.87 | 62 |
| CO | Conf657 | 747 | 20.9 | 156 | 0.45 | 0.42 | 64 |
| CO | Conf658 | 747 | 20.9 | 153 | 0.42 | 0.76 | 94 |
| CO | Conf664 | 765 | 20.6 | 146 | 0.37 | 0.62 | 61 |
| CO | Conf679 | 728 | 21.8 | 161 | 0.41 | 0.62 | 106 |
| CO | Conf700 | 753 | 21.0 | 159 | 0.36 | 0.38 | 85 |
| CO | Conf716 | 719 | 22.7 | 160 | 0.44 | 0.76 | 120 |
| CO | Conf737 | 709 | 22.5 | 134 | 0.30 | 0.76 | 98 |
| CO | Conf739 | 709 | 22.5 | 161 | 0.38 | 0.84 | 101 |
| CO | Conf743 | 784 | 18.6 | 160 | 0.39 | 0.66 | 118 |
| CO | Conf747 | 762 | 20.9 | 151 | 0.39 | 0.94 | 83 |
| CO | Conf753 | 747 | 20.2 | 146 | 0.38 | 0.77 | 96 |
| CO | Conf754 | 747 | 20.2 | 149 | 0.34 | 0.87 | 79 |
| GT | Tarn260 | 798 | 36.3 | 213 | 0.28 | 0.85 | 104 |
| GT | Tarn66 | | | 206 | 0.24 | 0.84 | 95 |
| GT | Tarn33 | 761 | 36.9 | 175 | 0.30 | 0.76 | 99 |
| GT | Tarn34 | 797 | 38.2 | 203 | 0.25 | 0.75 | 124 |
| GT | Tarn240 | 734 | 40.3 | 163 | 0.32 | 0.83 | 189 |
| GT | Tarn241 | 734 | 40.3 | 130 | 0.25 | 0.71 | 89 |
| GT | Tarn243 | 734 | 40.3 | 156 | 0.24 | 0.72 | 102 |
| GT | Tarn244 | 734 | 40.3 | 177 | 0.23 | 0.73 | 63 |
| GT | Tarn245 | 734 | 40.3 | 204 | 0.22 | 0.89 | 112 |
| GT | Tarn248 | 683 | 46.5 | 238 | 0.30 | 0.71 | 109 |
| GT | Tarn249 | 683 | 46.5 | 148 | 0.26 | 0.82 | 47 |
| GT | Tarn250 | 683 | 46.5 | 196 | 0.24 | 0.77 | 103 |
| GT | Tarn251 | 683 | 46.5 | 257 | 0.25 | 0.77 | 68 |
| GT | Tarn252 | 724 | 38.5 | 192 | 0.27 | 0.79 | 63 |
| GT | Tarn254 | 724 | 38.5 | 165 | 0.29 | 0.61 | 146 |
| GT | Tarn255 | 724 | 38.5 | 236 | 0.23 | 0.72 | 55 |
| GT | Tarn257 | 723 | 46.0 | 229 | 0.22 | 0.75 | 80 |
| GT | Tarn258 | 723 | 46.0 | 239 | 0.26 | 0.85 | 82 |
| GT | Tarn259 | 723 | 46.0 | 185 | 0.28 | 0.84 | 101 |
| SGJ | Jar557 | 614 | 11.5 | 248 | 0.31 | 0.73 | 45 |
| SGJ | Jar481 | 587 | 16.1 | 280 | 0.32 | 0.78 | 37 |
| SGJ | Jar488 | 624 | 8.9 | 250 | 0.34 | 0.68 | 45 |
| SGJ | Jar491 | 624 | 8.9 | 242 | 0.32 | 0.66 | 89 |
| SGJ | Jar498 | 589 | 21.0 | 238 | 0.26 | 0.73 | 54 |
| SGJ | Jar499 | 589 | 21.0 | 259 | 0.27 | 0.80 | 40 |
| SGJ | Jar503 | 618 | 16.6 | 232 | 0.22 | 0.86 | 41 |
| SGJ | Jar506 | 610 | 19.9 | 265 | 0.28 | 0.71 | 46 |
| SGJ | Jar511 | 620 | 18.3 | 252 | 0.25 | 0.75 | 39 |
| SGJ | Jar512 | 635 | 15.7 | 213 | 0.24 | 0.74 | 44 |

| | | | | | | | |
|-----|------------|-----|------|-----|------|------|-----|
| SGJ | Jar515 | 628 | 18.7 | 257 | 0.32 | 0.73 | 43 |
| SGJ | Jar540 | 621 | 17.9 | 159 | 0.27 | 0.67 | 43 |
| SGJ | Jar542 | 615 | 3.0 | 197 | 0.26 | 0.72 | 67 |
| SGJ | Jar543 | 615 | 3.0 | 227 | 0.28 | 0.59 | 34 |
| SGJ | Jar544 | 613 | 9.3 | 245 | 0.28 | 0.78 | 31 |
| SGJ | Jar545 | 616 | 4.4 | 272 | 0.31 | 0.82 | 47 |
| SGJ | Jar546 | 616 | 4.4 | 253 | 0.29 | 0.79 | 53 |
| SGJ | Jar548 | 614 | 14.8 | 272 | 0.28 | 0.78 | 43 |
| SGJ | Jar553 | 618 | 13.2 | 264 | 0.28 | 0.84 | 47 |
| SGJ | Jar554 | 618 | 13.2 | 316 | 0.27 | 0.79 | 73 |
| SGF | FCombe64 | 483 | 4.3 | 164 | 0.29 | 0.77 | 128 |
| SGF | FCombe57 | 526 | 6.3 | 127 | 0.34 | 0.82 | 142 |
| SGF | FCombe60 | 513 | 2.2 | 171 | 0.29 | 0.77 | 115 |
| SGF | FCombe61 | 501 | 2.7 | 200 | 0.37 | 0.79 | 68 |
| SGF | FCombe1003 | | | 126 | 0.33 | 0.80 | 146 |
| SGF | FCombe1005 | | | 114 | 0.34 | 0.34 | 174 |
| SGF | FCombe1006 | | | 121 | 0.28 | 0.28 | 168 |
| SGF | FCombe1007 | | | 122 | 0.28 | 0.88 | 134 |
| SGF | FCombe1031 | | | 130 | 0.37 | 0.78 | 118 |
| SGF | FCombe1032 | | | 185 | 0.28 | 0.77 | 107 |
| SGF | FCombe1033 | | | 171 | 0.31 | 0.70 | 113 |
| SGF | FCombe1034 | | | 190 | 0.28 | 0.75 | 126 |
| SGF | FCombe1035 | | | 160 | 0.35 | 0.88 | 111 |
| SGF | FCombe1036 | | | 147 | 0.38 | 0.67 | 83 |
| SGF | FCombe1037 | | | 172 | 0.25 | 0.79 | 139 |
| SGF | FCombe1039 | | | 173 | 0.37 | 0.74 | 66 |
| SGF | FCombe1040 | | | 184 | 0.35 | 0.73 | 98 |
| SGF | FCombe55 | 520 | 4.6 | 143 | 0.41 | 0.74 | 96 |
| SGF | FCombe58 | 529 | 7.6 | 150 | 0.45 | 0.51 | 119 |
| SGF | FCombe62 | 501 | 2.7 | 195 | 0.36 | 0.61 | 84 |
| SGA | Ajour410 | 427 | 18.9 | 214 | 0.32 | 0.71 | 85 |
| SGA | Ajour383 | 533 | 18.9 | 160 | 0.22 | 0.86 | 137 |
| SGA | Ajour384 | 527 | 21.2 | 156 | 0.35 | 0.89 | 99 |
| SGA | Ajour388 | 522 | 21.2 | 184 | 0.24 | 0.93 | 112 |
| SGA | Ajour390 | 533 | 18.9 | 176 | 0.26 | 0.90 | 138 |
| SGA | Ajour391 | 527 | 21.2 | 144 | 0.35 | 0.92 | 81 |
| SGA | Ajour392 | 503 | 26.9 | 181 | 0.26 | 0.82 | 65 |
| SGA | Ajour398 | 503 | 26.9 | 163 | 0.28 | 0.87 | 69 |
| SGA | Ajour399 | 503 | 26.9 | 179 | 0.27 | 0.76 | 64 |
| SGA | Ajour400 | 503 | 26.9 | 196 | 0.27 | 0.83 | 86 |
| SGA | Ajour405 | 477 | 26.0 | 176 | 0.30 | 0.84 | 92 |
| SGA | Ajour406 | 477 | 26.0 | 176 | 0.30 | 0.67 | 75 |
| SGA | Ajour407 | 477 | 26.0 | 176 | 0.26 | 0.87 | 73 |
| SGA | Ajour409 | 447 | 23.9 | 176 | 0.25 | 0.87 | 83 |
| SGA | Ajour411 | 446 | 22.9 | 166 | 0.24 | 0.71 | 79 |
| SGA | Ajour412 | 427 | 18.9 | 166 | 0.29 | 0.58 | 101 |
| SGA | Ajour1001 | | | 196 | 0.27 | 0.77 | 82 |
| SGA | Ajour1002 | | | 166 | 0.22 | 0.64 | 114 |
| SGA | Ajour389 | 522 | 21.2 | 164 | 0.26 | 0.89 | 130 |
| SGA | Ajour403 | 472 | 26.6 | 184 | 0.38 | 0.48 | 103 |

Annexe 20 - Détail des indices de Cropper (partie II § 1.2.4) pour les années caractéristiques intersites a) et intra-site b). Les années caractéristiques fortes sont en orange, extrêmes en rouge. Les années caractéristiques négatives sont en gras.
Source : Amodeli.

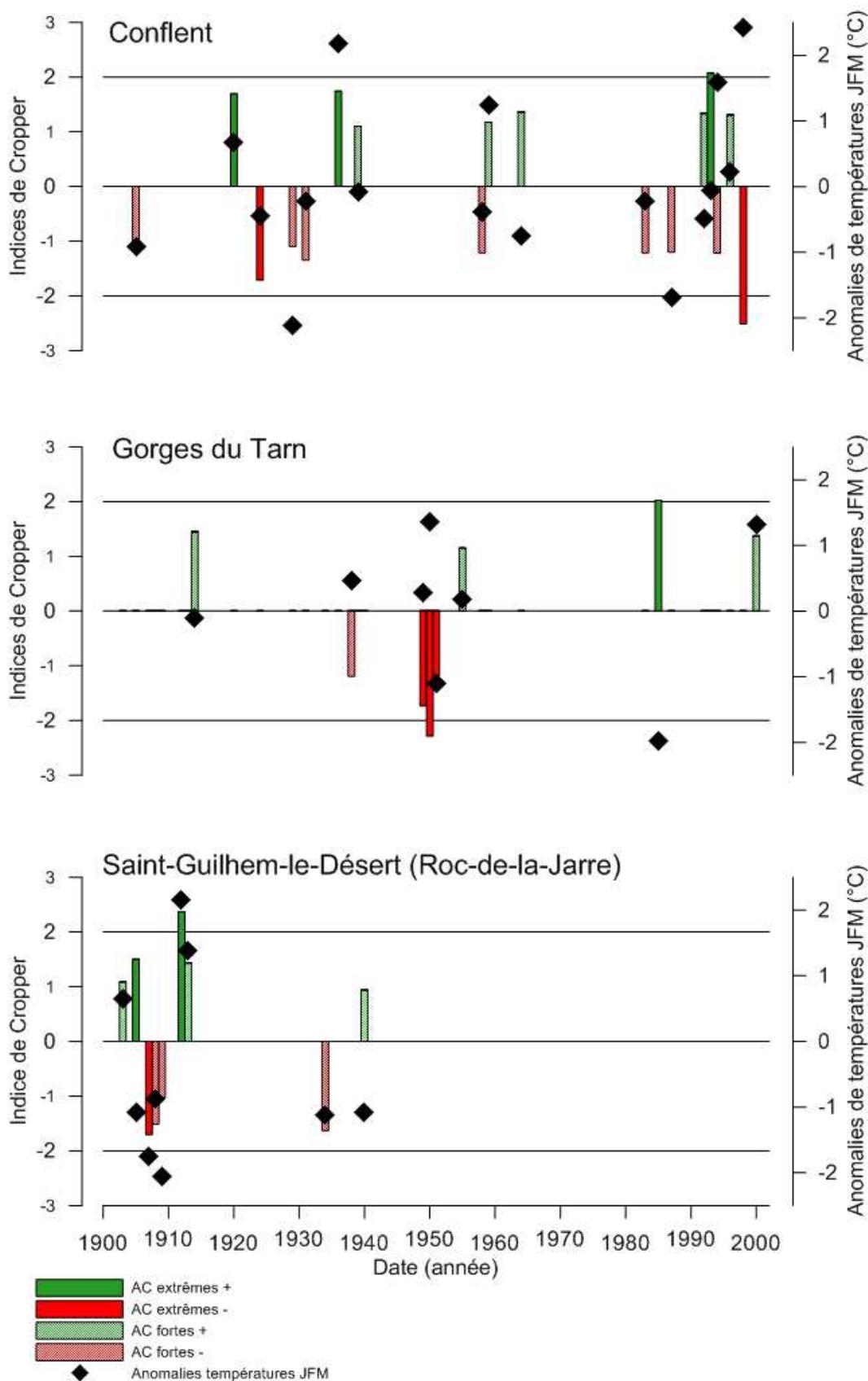
a)

| Année | CO | GT | SGJ |
|-----------|-------|-------|-------|
| 1903 | | | 1.09 |
| 1905 | -1.12 | | 1.50 |
| 1907 | | | -1.70 |
| 1908 | | | -1.51 |
| 1909 | | | -1.03 |
| 1912 | | | 2.37 |
| 1913 | | | 1.44 |
| 1914 | | 1.45 | |
| 1920 | 1.70 | | |
| 1924 | -1.71 | | |
| 1929 | -1.09 | | |
| 1931 | -1.35 | | |
| 1934 | | | -1.63 |
| 1936 | 1.74 | | |
| 1938 | | -1.19 | |
| 1939 | 1.10 | | |
| 1940 | | | 0.94 |
| 1949 | | -1.73 | |
| 1950 | | -2.29 | |
| 1951 | | -1.18 | |
| 1955 | | 1.15 | |
| 1958 | -1.21 | | |
| 1959 | 1.17 | | |
| 1964 | 1.36 | | |
| 1983 | -1.21 | | |
| 1985 | | 2.02 | |
| 1987 | -1.20 | | |
| 1992 | 1.34 | | |
| 1993 | 2.07 | | |
| 1994 | -1.22 | | |
| 1996 | 1.31 | | |
| 1998 | -2.51 | | |
| 2000 | | 1.37 | |
| Forte - | 7 | 1 | 3 |
| Extrême - | 2 | 3 | 1 |
| % - | 53% | 50% | 44% |
| Forte + | 5 | 3 | 3 |
| Extrême + | 3 | 1 | 2 |
| % + | 47% | 50% | 56% |
| Total | 17 | 8 | 9 |

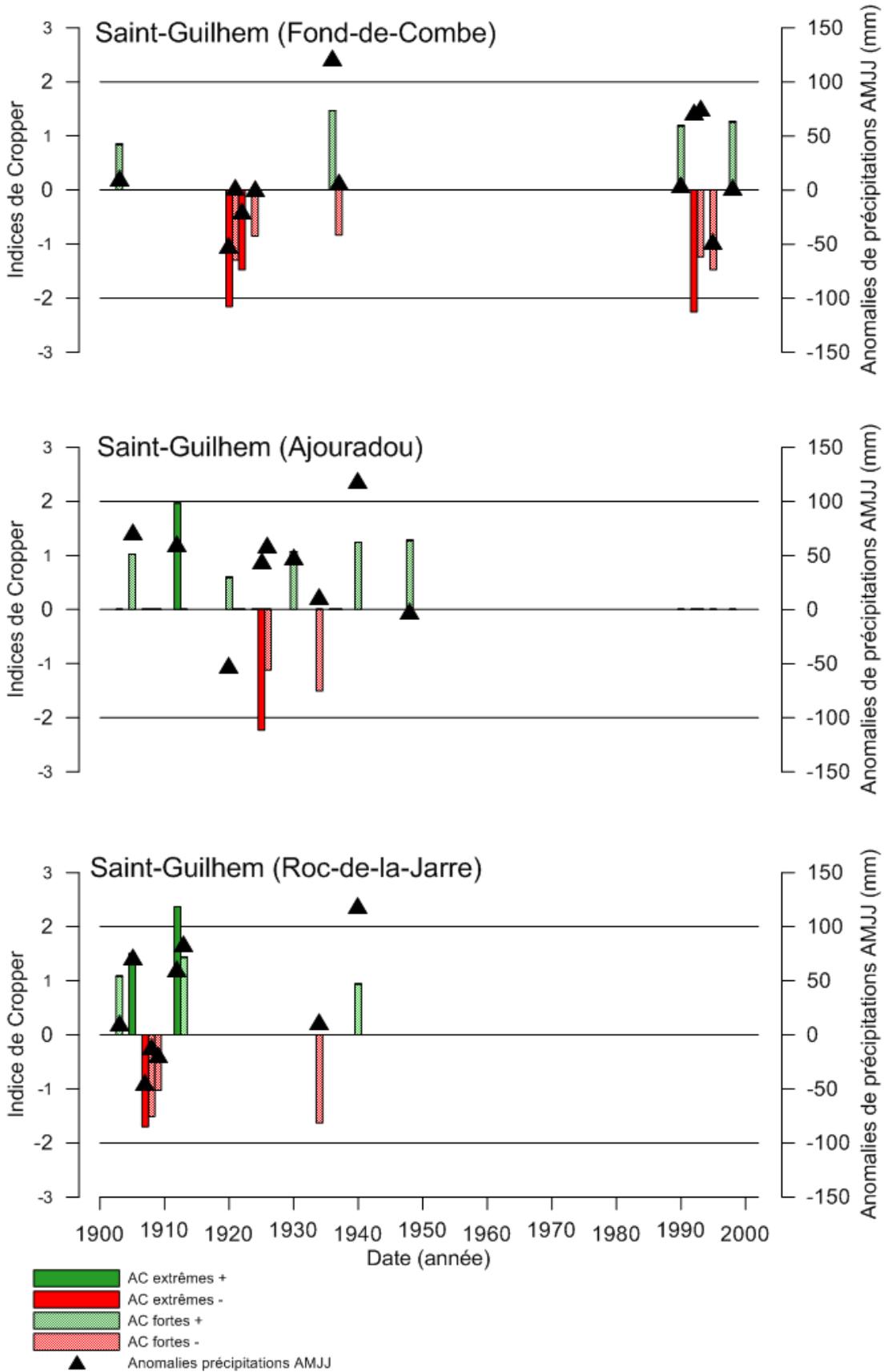
b)

| Année | SGF | SGA | SGJ |
|-----------|-------|-------|-------|
| 1903 | 0.85 | | 1.09 |
| 1905 | | 1.02 | 1.50 |
| 1907 | | | -1.70 |
| 1908 | | | -1.51 |
| 1909 | | | -1.03 |
| 1912 | | 1.97 | 2.37 |
| 1913 | | | 1.44 |
| 1920 | -2.16 | 0.60 | |
| 1921 | -1.30 | | |
| 1922 | -1.48 | | |
| 1924 | -0.85 | | |
| 1925 | | -2.23 | |
| 1926 | | -1.12 | |
| 1930 | | 1.07 | |
| 1934 | | -1.51 | -1.63 |
| 1936 | 1.47 | | |
| 1937 | -0.83 | | |
| 1940 | | 1.24 | 0.94 |
| 1948 | | 1.28 | |
| 1990 | 1.19 | | |
| 1992 | -2.26 | | |
| 1993 | -1.24 | | |
| 1995 | -1.48 | | |
| 1998 | 1.26 | | |
| Forte - | 5 | 2 | 3 |
| Extrême - | 3 | 1 | 1 |
| % - | 67% | 33% | 44% |
| Forte + | 4 | 5 | 3 |
| Extrême + | 0 | 1 | 2 |
| % + | 33% | 67% | 56% |
| Total | 12 | 9 | 9 |

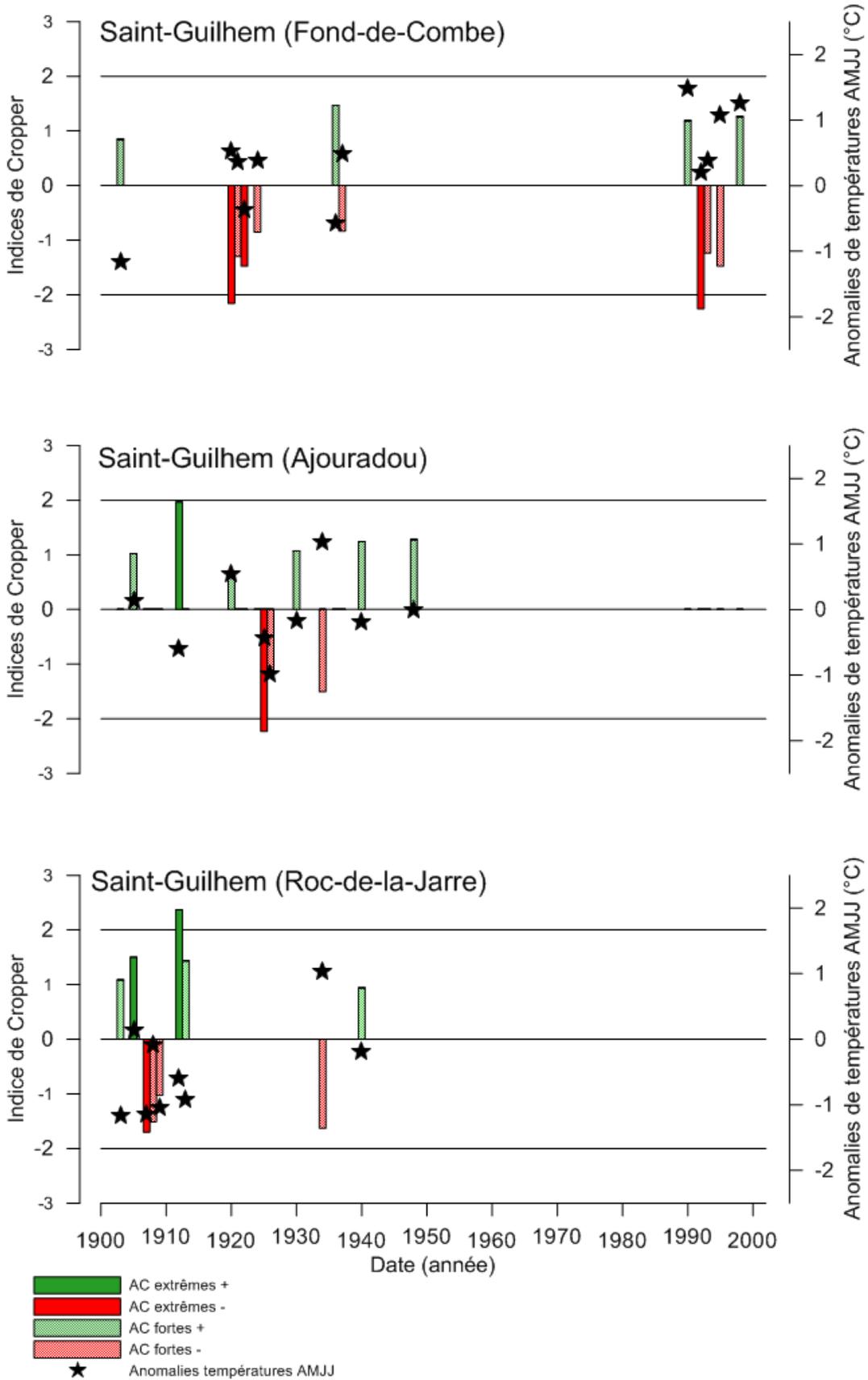
Annexe 21 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites de Saint-Guilhem (Roc-de-la-Jarre), des gorges du Tarn et du Conflent et anomalies de températures de janvier, février, mars (carrés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps. Source : Amodei.



Annexe 22 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites du Roc-de-la-Jarre, de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe et anomalies de précipitations d'avril, mai, juin, juillet (triangles) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps.
 Source : Amodei.



Annexe 23 - Années caractéristiques positives (+) et négatives (-) dans les sites du Roc-de-la-Jarre, de l'Ajouradou et de Fond-de-Combe et anomalies de températures d'avril, mai, juin, juillet (carrés) par rapport à la période 1961-1990 en fonction du temps. Source : Amodei.



Résumé

Le pin de Salzman, *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*, est une sous-espèce de pin noir endémique de l'Espagne et du Sud de la France. Son aire de distribution limitée en France fait des peuplements de pin de Salzman un habitat d'intérêt prioritaire au titre de la directive européenne 92/43/CEE (Natura 2000).

Dans cette étude, une approche dendroécologique est mise en œuvre afin de mieux comprendre la réponse du pin de Salzman aux variations du climat. La variabilité spatiale et temporelle de la réponse de la croissance radiale au climat est comparée d'une part, sur trois populations géographiquement éloignées (Conflent, gorges du Tarn et Saint-Guilhem-le-Désert) et d'autre part au sein d'un même peuplement (Saint-Guilhem-le-Désert) sur trois stations édaphiquement différentes.

Les pins de Salzman du Conflent présentent une sensibilité marquée au manque de précipitations durant la période de reprise de l'activité cambiale (mars à juin) alors que dans les gorges du Tarn et à Saint-Guilhem-le-Désert, les températures hivernales (février) et automnales de l'année précédente (octobre) sont corrélées respectivement positivement et négativement à la croissance radiale et expliquent plus de variance que les précipitations. Les pins poussant sur les stations les moins contraignantes édaphiquement présentent une sensibilité aux variables climatiques légèrement diminuée par rapport aux arbres des stations médiocres. Les résultats de cette étude suggèrent que le pin de Salzman est localement adapté ou présente une forte plasticité de sa croissance radiale lorsque les conditions environnementales changent.

Abstract

The Salzman pine, *Pinus nigra* ssp. *salzmannii*, is an endemic black pine native to Spain and the South of France. Its restricted distribution in France makes its current populations a protected habitat under European Directive 92/43/EEC (Natura 2000).

In this study, a dendroecological approach was used to understand the impact of climate change on Salzman pine. On the one hand, the spatial and temporal variability of radial growth response was compared in three different populations (Conflent, Gorges du Tarn et Saint-Guilhem-le-Désert). On the other hand, within one population (Saint-Guilhem-le-Désert), the influence of soil composition on growth was assessed by comparing the variability of radial growth response on three plots under different soil and topographic conditions.

The Conflent population showed a strong sensitivity to spring precipitation deficits (March to June) whereas, at the "Gorges du Tarn" and Saint-Guilhem-le-Désert sites, the winter (February) and autumnal (October) temperatures explained more variance than precipitations and were respectively positively and negatively correlated to radial growth. On favourable soil types, pines appeared to be less sensitive to climate variation than on the less fertile ones. The results of this study suggest a potential important effect of local adaptation or plasticity in the response of the Salzman pine to climate variations.