

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département d'Écologie et Environnement



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de Master en Écologie et Environnement
Spécialité: Biodiversité et Environnement

Thème

**Résilience de quelques peuplements forestiers de
l'Akfadou et des Babors (Béjaïa) face aux événements
climatiques extrêmes**

Présenté par :

KLALECHE Kenza

BEN AREZKI Liza

Devant le jury composé de:

KROUCHI Fazia	Professeure	UMMTO	Présidente
SLIMANI Saïd	Maître de conférences classe A	UMMTO	Promoteur
CHIKHAOUI Zakia	Maître assistante classe A	UMMTO	Examinatrice

Soutenue le 10/06/2025

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu tout-puissant de nous avoir donné la puissance et la volonté pour achever ce travail.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à monsieur SLIMANI Saïd qui nous a encadrées tout au long de ce mémoire et qui a su partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit remercié pour son engagement, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il nous a prodigués.

Nous exprimons notre profonde et respectueuse gratitude aux membres du jury ayant accepté d'évaluer ce travail, leur relecture attentive ainsi que leur regard à la fois critique et bienveillant.

Enfin, nous tenons à remercier nos parents qui ont été toujours là : vous avez tout sacrifié pour nous, n'épargnant ni santé ni effort. Vous nous avez donné un magnifique labeur et persévérance. Nous sommes redevables d'une éducation dont nous sommes fières.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère. Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour surmonter différentes épreuves.

A mon cher frère Mustapha dont les conseils avisés et le soutien constant m'ont guidé avec sagesse tout au long de mon parcours.

A mon frère Aghiles, mes sœurs Nadia et Karima pour leur écoute attentive, leur compréhension bienveillante et leurs encouragements.

A mes adorables neveux Rafik, Iline, Axel, Aris et Ramzi.

A mes amis, particulièrement Saïd, dont la présence, le soutien et les encouragements m'ont été d'un grand réconfort durant cette aventure.

Kenza

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents pour tous leurs sacrifices leurs soutiens, leurs encouragements et leur amour qui sont la raison de ma réussite ; cette aventure n'aurait certainement pas existé sans vous.

A mes frères et mes sœurs, qui ont toujours su me motiver même dans les moments de doute. Un grand merci pour leurs encouragements et leurs soutiens moral, spécifiquement nouna, Kenza, ma grande sœur et ces deux princesses Amélia et Alicia.

A tous les gens qui m'aiment, en témoignage de mon amour et de ma profonde admiration

LiSsa

Résumé

L'approche dendrochronologique a été adoptée pour analyser la résilience de *Cedrus atlantica* (un site), *Quercus canariensis* (deux sites) et *Q. afares* (un site) face à la sécheresse dans la région de Béjaïa. Une chronologie maîtresse a été établie pour chacun des peuplements à partir d'un total de 25 à 31 arbres carottés. Les chronologies obtenues ont été standardisées et les séries STD au seuil $EPS \geq 0,85$ ont été utilisées dans les analyses ultérieures. La méthode reposant sur la tendance interannuelle moyenne a été adoptée pour identifier les années caractéristiques (PYs), et les PYs négatives, correspondant aux années sèches, ont été utilisées dans l'analyse de la résilience des trois essences forestières. Les chronologies d'indices de croissance établies ont affiché une haute fluctuation, reflétant la forte variabilité climatique caractérisant la région d'étude. Les quatre chronologies établies sont corrélées significativement. Néanmoins, une analyse en composantes principales sépare nettement *C. atlantica*, un conifère, des trois autres sites de chênes caducifoliés, mettant en évidence des différences significatives entre leurs réponses à la variabilité climatique. Les indices de résilience ont affiché d'importantes différences entre les peuplements et au sein d'un même peuplement dans le temps. D'un côté, ces différences sont dues à l'importance du critère génétique (interspécifique) et aux conditions propres à chaque site, comme la topographie et les facteurs édaphiques. D'un autre côté, les résultats révèlent que l'élément le plus déterminant dans la résilience des espèces carottées est intimement lié aux conditions climatiques avant, pendant et après un événement sec. Par ailleurs, en considérant les PYs négatives communes au moins sur trois sites et dans des conditions climatiques plus ou moins similaires avant, pendant et après un événement sec, *C. atlantica* apparaît comme l'espèce la plus vulnérable à la sécheresse, avec les plus faibles potentiels de résistance, de récupération et de résilience. Entre les chênes, *Q. canariensis* a montré une plus forte résilience que *Q. afares*. Ces résultats présentent des informations précieuses pour la gestion durable de nos forêts dans le contexte des changements climatiques actuels.

Mots-clés: dendrochronologie, années caractéristiques, résilience, *Cedrus atlantica*, *Quercus canariensis*, *Quercus afares*, Algérie.

Abstract

The dendrochronological approach was adopted to assess the resilience of *Cedrus atlantica* (one site), *Quercus canariensis* (two sites) and *Q. afares* (one site) to drought in the region of Béjaïa. A master chronology was developed for each stand, using samples from a total of 25 to 31 cored trees. The obtained tree-ring series were detrended and the STD chronologies with an EPS threshold ≥ 0.85 were used in the subsequent analyses. The interval trend method was adopted to identify the pointer years (PYs), and the negative PYs, corresponding to the dry years, were used in analysing the resilience of the three tree forest species. The developed growth index series exhibited a high fluctuation, reflecting the strong climate variability in the region of study. The four chronologies were significantly correlated. However, a principal component analysis clearly separates *C. atlantica*, a conifer, from the three stands of deciduous oaks, highlighting interspecific differences in their responses towards climate variability. The resilience indices exhibited substantial differences between the stands and within a same stand over time. On the one hand, these differences are due to the importance of the genetic criterion (interspecific) and to the local conditions characterising each site, such as topography and edaphic factors. On the other hand, the results revealed that the main determining element in the resilience of the four sampled stands were closely related to the climate conditions before, during and after a dry event. Moreover, while considering PYs recorded in at least three of the four sampled sites, and in more or less similar conditions before, during and after a dry event, *C. atlantica* appeared to be the most sensitive to drought, with the lowest potential of resistance, recovery, and resilience. In addition, among the oaks, *Q. canariensis* exhibited a higher resilience than *Q. afares*. These findings provide relevant information for sustainable forest management within the framework of the current climate change.

Keywords: dendrochronology, pointer years, resilience, *Cedrus atlantica*, *Quercus canariensis*, *Quercus afares*, Algeria.

Table des matières

Introduction	01
Chapitre I. Matériel et Méthodes	05
1.1. Etude du milieu	05
1.1.1. Situation géographique et administrative des sites d'études	05
1.1.2. Géologie	08
1.1.3. Sol	08
1.1.4. Géomorphologie	09
1.1.5. Climat	09
1.1.6. Végétation	10
1.1.7. Etat des peuplements étudiés	11
1.2. Méthodes	11
1.2.1. Carottage	11
1.2.2. Préparation des échantillons	13
1.2.3. Datation et établissement des chronologies maîtresses	14
1.2.3.1. Datation et interdatation	14
1.2.3.2. Mesure des largeurs des cernes de croissance	14
1.2.3.3. Validation statistique de l'interdatation	15
1.2.3.4. Standardisation des profils de croissance	15
1.3. Analyses statistiques	16
1.3.1. Caractérisation de la donnée dendrochronologique	16
1.3.2. Identification des années caractéristiques	17
1.3.3. Calcul des indices de résilience	18
Chapitre II. Résultats et Discussion	21
2.1. Caractéristiques principales des chronologies établies	21
2.2. Analyse des années caractéristiques	27
2.3. Analyse des indices de résilience	29
Conclusion	36
Références bibliographiques	39
Annexes	47

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques géographiques et topographiques des deux sites d'étude.	07
Tableau 1.2. Campagnes d'échantillonnage et nombre d'arbres échantillonnés par site.	12
Tableau 2.1. Caractéristiques principales des chronologies brutes générées sous COFECHA.	21
Tableau 2.2. Caractéristiques principales des chronologies STD.	23
Tableau 2.3. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies STD sur leur période commune (1833-2023) au seuil EPS 0.85. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson, suivi de la valeur-p.	27

Liste des figures

Figure 1.1. Localisation des sites d'étude (plan Google Earth Pro modifié).	05
Figure 1.2. Vue générale sur la cédraie du mont Takoucht (photo : S. Slimani).	06
Figure 1.3. Aspect de la chênaie caducifoliée du mont Issek en hiver (photo : S. Slimani).	06
Figure 1.4. Aspect du peuplement de chêne zéen du site de l'Akfadou (photo : S. Slimani).	07
Figure 1.5. Extraction d'une carotte d'un cèdre de l'Atlas à TAK (photo : S. Slimani).	13
Figure 1.6. Surface de deux carottes poncées après montage sur des supports en bois rainurés : en haut, l'échantillon 24B d'un cèdre de l'Atlas du mont Takoucht, caractéristique des résineux, avec un cerne dont la limite est déterminée par un bois d'été sombre ; en bas, l'échantillon 28B d'un chêne zéen du massif de l'Akfadou, caractéristique des feuillus caducifoliés avec un bois à zones poreuses (gros vaisseaux conducteurs du bois de printemps) suivies de zones compactes (bois d'été) (captures sous CooRecorder 9.8.1 : S. Slimani).	13
Figure 2.1. Chronologies brutes établies pour les quatre sites d'études.	22
Figure 2.2. Chronologies STD au seuil EPS de 0.85 pour les quatre sites d'études...	25
Figure 2.3. Analyse en composantes principales : plan 1-2 des chronologies STD (variables).	26
Figure 2.4. Diagramme à points des années caractéristiques (<i>Pointer Years</i>) identifiées sur les quatre chronologies établies au seuil EPS 0.85.	28
Figure 2.5. Indices de résistance pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.	33
Figure 2.6. Indices de récupération pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.	34
Figure 2.7. Périodes de récupération pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.	34
Figure 2.8. Indice de résilience pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.	35

Introduction

Introduction

Les forêts abritent la majeure partie de la biodiversité terrestre de la planète (Vié *et al.*, 2009). Entre autres, elles stockent efficacement le carbone dans leurs biomasses et leurs sols (Seymour *et al.*, 2022 in FAO, 2024), contribuent grandement à la sécurité alimentaire et à la nutrition humaines (FAO, 2022), conservent les ressources hydriques, fournissent une multitude de services écosystémiques et font office de tampons face aux phénomènes météorologiques extrêmes (Libert-Amico *et al.*, 2022). Toutes ces fonctions font des écosystèmes forestiers un élément essentiel de l'adaptation et de la résilience face au changement climatique (Vié *et al.*, 2009).

Le changement climatique actuel est marqué par une augmentation de la température moyenne à la surface du globe terrestre de 1,1 °C entre 2011 et 2020 par rapport à la période préindustrielle (1850-1900), associée à une hausse spectaculaire en événements extrêmes, notamment en épisodes de canicule, de pluie diluvienne et de sécheresse, dont les conséquences seraient principalement dues aux activités anthropiques depuis au moins 1971 (IPCC, 2023).

Cette variabilité climatique est en train de rendre les forêts plus vulnérables face à des facteurs de stress abiotiques et biotiques (FAO, 2024 ; Piedallu, 2024). En effet, des épisodes de dépérissement forestier, principalement dus aux stress hydrique et thermique, sont signalés un peu partout dans le monde (Allen *et al.*, 2010). De même, l'intensité de la fréquence des incendies de forêt augmentent de plus en plus. En 2021, les forêts boréales représentaient près d'un quart des émissions de dioxyde de carbone dues à ces incendies. Les feux ont émis environ 6 687 mégatonnes de dioxyde de carbone dans le monde en 2023, soit plus du double des émissions de dioxyde de carbone provenant du brûlage de combustibles fossiles dans l'Union européenne cette même année. Aux USA, 25 millions d'hectares de terres forestières devraient, d'après les projections, subir des pertes supérieures à 20 % de la surface terrière des arbres hôtes à cause des insectes et des maladies d'ici 2027 (FAO, 2024).

La forêt méditerranéenne figure parmi les formations les plus touchées par les changements climatiques actuels (Allen *et al.*, 2010 ; Touchan *et al.*, 2010 ; Gauquelin, 2016 ; Ladier, 2022). Par ailleurs, il y a lieu de signaler que les effets de cette variabilité climatique sont de loin beaucoup plus ressentis au niveau de la rive sud du bassin méditerranéen, notamment au niveau du patrimoine forestier algérien, qui a été affecté de plein fouet et à maintes reprises par des épisodes de dépérissements aux cours des dernières décennies

(Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014 ; Navarro-Cerrillo *et al.*, 2019 ; Sarmoum *et al.*, 2019 ; Slimani *et al.*, 2021b).

Dans ce contexte de préoccupation majeure, en considérant tous les secteurs socioéconomiques, dans son dernier rapport sur la situation des forêts dans le monde, la FAO (2024) souligne que les effets des changements climatiques dépendront en grande partie de la proportion dans laquelle les pays pourront renforcer la résilience de leurs forêts face à l'évolution future du climat (FAO, 2024).

Dans cette perspective, et afin de prévenir le déclin de nos écosystèmes forestiers, des études pour bien cerner leur fonctionnement vis-à-vis de la variabilité climatique à long terme s'imposent. Ceci nécessite une base de données couvrant de longues périodes de temps. Or, dans la plupart des cas, les séries climatiques disponibles au niveau des stations météorologiques sont loin de couvrir des périodes permettant d'atteindre de tels objectifs. C'est notamment le cas en Algérie où, malgré le fait que les mesures de données climatiques aient commencé au début des années 1900, elles se trouvent souvent entachées de lacunes et ne sont, en général, utilisables qu'à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle (Slimani, 2014). À cet effet, la dendrochronologie, qui utilise les signaux (notamment climatiques) enregistrés dans les cernes de croissance d'arbres pluricentennaires, se présente comme une alternative très intéressante, pouvant palier ces insuffisances sur le plan spatiotemporel (Fritts, 1976).

La dendrochronologie algérienne est relativement récente. Les premières publications y remontent aux années 1990 (Safar *et al.*, 1992 ; Tessier *et al.*, 1994 ; Messaoudène et Tessier, 1997) et la plupart des articles impliquant des sites forestiers algériens ont traité de la relation cerne-climat (Messaoudène et Tessier, 1997 ; Slimani *et al.* 2014a ; Garah *et al.*, 2016 ; Touchan *et al.*, 2017 ; Sarmoum *et al.*, 2019 ; Tafer *et al.*, 2022...). En effet, très peu d'articles scientifiques ont été dédiés à d'autres thématiques et disciplines de la dendrochronologie. A titre d'exemple, les seules publications traitant de la reconstruction climatique (dendroclimatologie) sont celles de Touchan *et al.* (2008, 2010, 2016), Kherchouche *et al.* (2012, 2013), Slimani *et al.* (2021a) et Anchukaitis *et al.* (2024), la reconstitution de l'historique des incendies (dendropyrochronologie) n'a été traitée que dans deux articles (Slimani *et al.*, 2014b ; Kherchouche *et al.*, 2019) et une seule publication a été dédiée à l'impact des défoliations périodiques causées par les insectes (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff. dans ce cas) sur la croissance radiale (dendroentomologie) (Sbadjji *et al.*, 2015).

A notre connaissance, seule l'analyse cerne-climat rapportée par Sarmoum *et al.* (2024) traite de la résistance de nos forêts face à la sécheresse. Par ailleurs, aucune étude

dendrochronologique publiée n'a reposé uniquement sur l'utilisation des années caractéristiques (pointer years : PYs) pour analyser la résilience de nos forêts vis-à-vis de la sécheresse : les PYs positives correspondent aux cernes larges, souvent produits lors des années humides, et les PYs négatives, aux cernes minces, généralement élaborés lors des années sèches Douglass (1946).

Il existe plusieurs techniques d'identification des années caractéristiques. Les méthodes les plus utilisées sont décrites par Jetschke *et al.* (2019). Une méthode reposant sur la normalisation des chronologies sur une moyenne mobile de quelques années (à fixer par l'utilisateur) avant et après chaque année que constitue une chronologie donnée afin d'identifier une augmentation ou une chute substantielles de la croissance suite à un événement climatique extrême a été fournie par Cropper (1979). Une variante de cette méthode a été proposée par Neuwirth *et al.* (2007), afin de spécifier l'intensité d'une année caractéristique (faible, forte et extrême). Deux autres méthodes ont été rapportées par Schweingruber *et al.* (1990), dont une repose sur le changement relatif de la croissance (aussi appelé changement brusque de croissance) lors d'une année donnée par rapport à celle d'un nombre (à fixer par l'utilisateur) d'années précédentes, et une autre sur la tendance interannuelle moyenne de la croissance. Enfin, des méthodes les plus utilisées, Qin *et al.* (2011), Scharnweber *et al.* (2013) et Simon et Lena (2016) ont décrit une autre méthode se basant sur la transformation en Z sur l'ensemble de la chronologie établie pour un site donné.

La présente étude porte sur l'analyse de la résilience de trois essences forestières (le cèdre de l'Atlas, le chêne zéen et le chêne afarès) relevant de quatre peuplements forestiers de la région de Béjaïa à la variabilité climatique à long terme. Les objectifs principaux sont i) dans un premier temps, de tester toutes les méthodes d'identification des années caractéristiques sus-citées et d'en choisir la plus adaptée à nos sites d'étude afin d'identifier les évènements extrêmes humides et secs et, ensuite, ii) d'utiliser les PYs négatives identifiées, correspondant aux années sèches, afin d'analyser la résilience des formations considérées à la sécheresse à travers ces quatre composantes fournies dans le programme *pointRes* (Van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2015, 2021): les indices de *résistance*, de *récupération* et de *résilience*, tels que décrits par Lloret *et al.* (2011), ainsi que la *période de récupération* comme définie par Thurm *et al.* (2016).

Ce document est organisé comme suit : cette introduction est suivie d'un premier chapitre qui présente la région d'étude et décrit les caractéristiques des sites choisis dans le

cadre de ce travail, avant de détailler la méthodologie adoptée pour la préparation de la donnée ainsi que les analyses statistiques utilisées. Les résultats obtenus ainsi que leur discussion sont présentés dans le deuxième chapitre. Enfin, une conclusion récapitule les principaux résultats de cette étude, souligne ses limites et ouvre des perspectives futures de recherche pour une meilleure appréhension de la problématique traitée.

Chapitre I

Matériel et Méthodes

Chapitre I

Matériel et Méthodes

1.1. Etude du milieu

1.1.1. Situation géographique et administrative des sites d'études

Le présent travail a été réalisé au niveau de quatre sites appartenant à trois formations forestières relevant par la conservation des forêts de la wilaya de Bejaïa (Figure 1.1).



Figure 1.1. Localisation des sites d'étude (plan Google Earth Pro modifié).

Les deux premières forêts sont localisées au cœur de la chaîne des Babors, au niveau de deux massifs adjacents situés dans la partie orientale de la wilaya de Bejaïa: le premier site est celui de la cédraie (*Cedrus atlantica*) du mont Takoucht (TAK)(Figure 1.2); le deuxième et le troisième sites sont localisés au niveau du mont Issek et consistent, respectivement, à un peuplement de feuillus caducifoliés dominé par le chêne zéen (*Quercus canariensis* : ISEQC) et à un autre dominé par le chêne afarès (*Q. afares* : ISEQA) (Figure 1.3). Le quatrième et dernier site est quant à lui situé dans la partie occidentale de la wilaya de Bejaïa, au niveau du

massif de l'Akfadou (AKF) et est représenté par un peuplement de chêne zéen (*Q. canariensis*) (Figure 1.4).



Figure 1.2. Vue générale sur la cédraie du mont Takoucht (photo:S.Slimani).

Le mont Takoucht (Figure 1.2) est situé à environ 28Km à l'est de la ville de Bejaïa. Il culmine à 1896 mètre d'altitude et est entouré par plusieurs montagnes : le mont Issek au nord, le massif de Kherrata au sud, Adrar Amellal à l'est et Djebel Bou Amrane à l'ouest. L'espace forestier de Takoucht s'étale sur une surface de 467,50 hectares, localisée principalement dans la commune d'Ait Smail (wilaya de Bejaïa). Il est bordé par les villages de Tala Atta (commune d'Ait Smail) et d'Ait Ali Oumhend (commune de Takesriout) au nord, par le village de Djermouna (commune de Kherrata) au sud, par Adrar Amellal à l'est et par le village de Tararist (commune de Bouandas, Sétif) à l'ouest.



Figure 1.3. Aspect de la chênaie caducifoliée du mont Issek en hiver (photo:S.Slimani).

Le mont Issek est situé entre les communes de Tizi N'Berber et d'Ait Smail, à environ 6 Km au nord du mont Takoucht et à 23Km au sud-est de Bejaïa. Il culmine à une altitude

de 1734 mètres. Ce sommet fait partie de la chaîne de Babors, connu pour sa biodiversité et ses paysages pittoresques, faisant face au golfe de Bejaia. Les deux sites relevant de la chênaie caducifoliée de ce mont sont situés vers le sommet, près de la ligne de crête (Figure 1.3).

Le massif de l'Akfadou est une vaste étendue boisée entre les wilayas de Béjaïa et de Tizi Ouzou. Le site d'étude relevant de ce massif est situé au niveau du lieu-dit Antennes d'Akfadou, près du plan d'eau nommé lac de l'Antenne ou lac Izem (Figure 1.4), à la limite entre les wilayas de Béjaïa et de Tizi Ouzou, à environ 48 km au sud-ouest de la ville de Béjaïa et à la même distance au sud-est de la ville de Tizi Ouzou.



Figure 1.4. Aspect du peuplement de chêne zéen du site de l'Akfadou (photo: S.Slimani).

Les caractéristiques géographiques et topographiques des quatre sites d'études sont résumées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Caractéristiques géographiques et topographiques des deux sites d'étude.

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Exposition	Pente (%)
TAK	36°31'30,3''N	005°12'01,6''E	1378-1869 m	Versant nord	60-80%
ISE	ISEQC 36°33'59,9''N	005°13'08,7''E	1588-1689 m	Versant nord	50-70 %
	ISEQA 36°34'01.3''N	005°13'01.7''E	1462-1672 m	Versant nord	45-80 %
AKF	36°37'46.5''N	004°34'47.5''E	1561-1620 m	Versant sud	05-15 %

1.1.2. Géologie

La géologie des Babors dont dépendent TAK, ISEQC et ISEQA est caractérisée par une structure constituée de chaînons calcaires qui bordent la côte du golfe de Bejaïa. Ces montagnes exposent les couches les plus internes du domaine tellien, avec la majorité des déformations géologiques survenues à la fin du Crétacé. La complexité de l'évolution tectonique au Mésozoïque est représentative de l'ensemble de l'orogénèse tellienne, influencée par la position du domaine sur la marge nord de la plaque africaine. Cette évolution peut être comparée à une zone décrochante étendue, soumise aux mouvements de coulissage de l'Afrique par rapport à l'Europe au cours de la première partie du Mésozoïque (Obert, 1984). Duplan (1952) *in* Ouigra (2022) rapporte que la structure géologique de l'aire d'échantillonnage des trois sites sus-cités est formée par une lame de calcaire liasique subverticale.

La configuration géologique du massif de l'Akfadou dont dépend AKF est principalement constituée de grès numidiens d'âge aquitanien et de flyschs massyliens (Gélard, 1978).

1.1.3. Sol

Le sol de TAK repose sur une roche mère calcaire. Il est, en général, superficiel, caractérisé par une forte porosité et un drainage rapide. La litière est assez marquée par endroits et est formée principalement par les feuilles issues du cèdre de l'Atlas et du chêne vert.

Le du mont Issek dont relèvent ISEQC et ISEQA est caractérisé par un sol instable, composé par des calcaires, des schistes et des grés marqués par une forte porosité et un drainage rapide (Duplan, 1952 *in* Ouigra, 2022 ; Obert, 1974). L'aire d'échantillonnage est caractérisée par un sol plus ou moins profond sur lequel repose une litière épaisse.

D'après une étude réalisée sur 9 profils pédologiques au niveau du massif de l'Akfadou et dans le district de Yakouren, Durand (1951) *in* Rabhi (2011) rapporte que la nature de la roche mère est le facteur clé déterminant le type du sol ; la nature de la végétation n'y a qu'une influence superficielle. AKF repose sur un substrat gréseux, donnant un sol brun lessivé, légèrement acide, assez perméable et avec une litière plus abondante sur la partie supérieure de l'aire échantillonnée.

1.1.4. Géomorphologie

Les quatre sites d'études se présentent sur des zones montagneuses. Néanmoins, la géomorphologie de AKF se distingue de celles des sites relevant de la chaîne des Babors (TAK, ISEQC et ISEQA), qui, elles, sont plus ou moins comparables (Tableau 1.1).

L'aire d'étude de TAK est comprise entre 1378 et 1713 m d'altitude. Les arbres carottés se développent sur le versant nord et sur une pente raide.

Les aires d'échantillonnage des deux sites du mont Issek se chevauchent au niveau du versant nord vers le sommet du massif : ISEQC s'étalent entre 1588 et 1689 m et ISEQA couvre un gradient altitudinal allant de 1462 à 1672 m. Les deux aires d'étude se présentent sur des pentes assez élevées, mais moins fortes que celles de TAK.

Contrairement aux trois premiers sites, AKF se présente sur le versant sud. Son aire d'échantillonnage couvre la dénivelée la plus faible, avec un gradient altitudinal allant de 1561 à 1620 m. Les arbres sondés croissent sur des pentes faibles.

1.1.5. Climat

La caractérisation du climat de TAK et des sites du mont Issek (ISEQC et ISEQA) repose sur les synthèses climatiques effectuées, respectivement, par Ourdani (2017) et Ouigra (2022) à partir de la donnée de la station météorologique de Béjaïa, extrapolée pour ces mêmes aires d'échantillonnage.

TAK est caractérisé par une température moyenne annuelle de 10 °C. Le mois le plus chaud est août, avec une moyenne des maxima (M) de l'ordre de 19,2 °C. Avec une moyenne des minima (m) de l'ordre de 1,4 °C, janvier est le mois le plus froid. Le cumul moyen des précipitations annuelle est de 1409,4 mm.

Situés sur vers le sommet du mont Issek, ISEQC et ISEQA ont caractérisés par une température moyenne annuelle de 8,9 °C. Le mois le plus chaud est août avec une moyenne des maxima (M) de l'ordre de 18,4 °C et le mois le plus froid est janvier avec une moyenne des minima (m) de l'ordre de 1 °C. Le cumule moyen des précipitations annuelles est de 1 459,6 mm.

La synthèse climatique de notre site du massif de l'Akfadou repose principalement sur les calculs rapportés par Laribi (2016) pour le Col de l'Akfadou, un site adjacent à l'aire d'échantillonnage de AKF. La moyenne des températures maximales (M) est enregistrée au mois d'août avec 27,2 °C et le mois le plus froid est janvier avec une moyenne des minima (m) de l'ordre de 1,7 °C. Par ailleurs, l'auteur rapporte une précipitation de l'ordre de 1 318 mm/an à une altitude de 1 370 m. Situé vers le point culminant du massif de l'Akfadou, AKF

recevrait donc une précipitation entre 1 318 et 2 000 mm/an (Messaoudène, 1989 in Rabhi, 2011).

Par ailleurs, nos quatre sites sont caractérisés par un climat méditerranéen, avec un hiver frais et pluvieux et un été chaud et sec. La période sèche est de trois mois, s'étalant de juin à fin-août. Les chutes de neige sont enregistrées à partir du mois de novembre et peuvent aller jusqu'au début du mois de mai et les brouillards y sont fréquents (Salamani, 1991 ; Gharzouli, 2007). Par ailleurs, ces quatre aires d'échantillonnage sont toutes situées dans l'étage bioclimatique hyper-humide à hiver frais (Laribi, 2016 ; Ourdani, 2017 ; Ouigra, 2022).

1.1.6. Végétation

L'identification des espèces au niveau des quatre aires d'étude repose sur la systématique adoptée par Dobignard et Chatelain (2010-2013).

TAK est une cédraie pure, caractérisée par une présence mineure de *Quercus ilex*, *Juniperus oxycedrus*, *Taxus baccata* et *Acer monspessulanum*. La strate arbustive est peu déployée et est marquée par la présence de *Crataegus laciniata*, *Prunus prostrata*, *Rhamnus alpina*, *R. lycioides*, *Bupleurum spinosum*, *Berberis hispanica*, etc. La strate herbacée est assez diversifiée. Elle est composée essentiellement des espèces suivantes : *Ampelodesmos mauritanicus*, *Anthyllis montana*, *Artemisia atlantica*, *Origanum vulgare* subsp. *glandulosum*, *Blackstonia perfoliata*, *Brachypodium* sp., *Bupleurum montanum*, *Cerastium glomeratum*, *Dactylis glomerata*, *Festuca atlantica*, *Helichrysum stoechas*, *Inula montana*, *Phlomis bovei*, *Poa bulbosa*, *Scabiosa columbaria*, *Lomelosia crenata*, *Senecio perralderianus*, *Teucrium chamaedrys*, *Teucrium kabylicum*, *Teucrium polium*, *Trifolium campestre*, *Trifolium stellatum*, *Xeranthemum inapertum*.

L'aire d'échantillonnage du mont Issek, dont relèvent ISEQC et ISEQA, est une chênaie caducifoliée à *Quercus canariensis* et *Q. afares*. La strate arborescente est plus déployée qu'à TAK et est, par endroit, marquée par une présence importante d'*Acer monspessulanum* et une présence mineure de *A. campestre*, *Sorbus torminalis* et *Prunus avium*. Malgré le pâturage intensif, la strate arbustive est bien fournie. Elle est principalement représentée par *Coriaria myrtifolia*, *Crataegus laciniata*, *Ilex aquifolium*, *Rhamnus alpina*, *R. lycioides*, *Rosa sicula*, *Rubus incanescens*, *R. ulmifolius*... La strate herbacée est riche en espèces. Entre autres, on cite la présence de *Ampelodesmos mauritanicus*, *Arctium minus*, *Artemisia atlantica*, *Atractylis cancellata*, *Blackstonia perfoliata*, *Bupleurum montanum*, *B. spinosum*, *Carlina involucrata*, *Catananche coerulea*, *Cerastium glomeratum*, *Cirsium echinatum*, *Ptilostemon rhiphaeus*, *Cynosurus balansae*, *Dactylis glomerata*, *Dianthus caryophyllus*, *Erodium chium*,

Festuca atlantica, *Helichrysum stoechas*, *Inula montana*, *Iris unguicularis*, *Jurinea humilis*, *Origanum vulgare* subsp. *glandulosum*, *Paeonia corallina*, *Phlomis bovei*, *Sambucus ebulus*, *Scabiosa columbaria*, *Lomelosia crenata*, *Sedum acre*, *Sideritis montana*, *Teucrium chamaedrys*, *T. kabylicum*, *T. polium*, *Trifolium campestre*, *Xeranthemum inapertum* et *Vinca difformis*.

L'aire d'échantillonnage de AKF présente la structure la plus simple des quatre sites étudiés. Il s'agit d'un peuplement ouvert et pur de chêne zéen, avec une présence mineure de *Q. ilex*, *Prunus avium* et *Acer obtusatum*. La présence de *Hedera helix* sur les arbres est notable. Le surpâturage limite sensiblement le déploiement du sous-bois, dominé par *Cytisus vilosus*, *Crataegus monogyna*, *Calicotome spinosa*, *Rubus ulmifolius* et *Rosa canina*. La strate herbacée est très rase, mais représentée par une grande variété d'espèces, comme *Ampelodesmos mauritanicus*, *Scabiosa sp.*, *Phlomis bovei*, *Dactylis glomerata*, *Festuca sp.*, *Asphodelus ramosus* et *Ficaria verna*.

1.1.7. Etat des peuplements étudiés

Les formations forestières étudiées subissent une forte activité anthropique. Le surpâturage y est une pratique ancestrale et de nombreux arbres montrent des cicatrices de feux, notamment à Issek et Takoucht, marqués par une forte activité d'incendie, surtout en basses altitudes où la végétation est réduite à un maquis dégradé, voire à une broussaille. Des coupes illégales sont observées au niveau des zones boisées les plus accessibles. Par ailleurs, si quelques cas d'arbres en déclin aient été observés dans les trois monts d'étude, le taux de dépérissement y reste très faible.

1.2. Méthodes

1.2.1. Carottage

L'approche dendrochronologique a été adoptée afin d'évaluer la réponse de trois espèces arborescentes au niveau de quatre sites forestiers, à savoir le cèdre de l'Atlas (TAK), le chêne zéen (ISEQC et AKF) et le chêne afarès (ISEQA), à la variabilité climatique à long terme.

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées pour chaque site : la première a été effectuée en 2016 et, afin d'actualiser la donnée obtenue, une deuxième campagne a été réalisée en 2024. Les périodes d'échantillonnage ainsi que le nombre d'arbres sondés par site et par campagne d'échantillonnage sont consignés dans le tableau 1.2.

L'échantillonnage consiste à un carottage sur des arbres vivants, en bonne santé, exempts de cicatrices ou d'anomalies visibles et présentant un minimum de 50 cernes annuels de croissance. Ce dernier critère a été retenu afin d'assurer la fiabilité de l'interdatation (Holmes,1983). Deux carottes (A et B) ont été extraites par arbre à l'aide d'une tarière de Pressler (Figure 1.5) sur des positions opposées. Dans peu de cas, où les carottes sont courtes ou en partie détériorées, l'extraction d'une troisième carotte a été jugée utile. Les prélèvements ont été effectués à hauteur de référence de 1,30 m (hauteur de poitrine), zone où le tronc et généralement rectiligne et où les cernes de croissance sont moins sujets à des distorsions (Delwaide et Filion, 2010). Les individus sélectionnés de diamètres faible à moyen, inférieurs à la longueur de la tarière, ont été forés jusqu'au cœur. Les sujets avec un tronc présentant une légère inclinaison, ont été sondés de manière à éviter le bois de réaction, en choisissant une position perpendiculaire l'axe d'inclinaison (Fritts,1976).

Tableau 1.2.Campagnes d'échantillonnage et nombre d'arbres échantillonnés par site.

Site	Campagne d'échantillonnage	Nombre d'arbres	Total
TAK	Août 2016	20	28
	Avril 2024	08	
ISEQC	Août 2016	20	28
	Mars 2024	08	
ISEQA	Août 2016	20	28
	Mars 2024	08	
AKF	Août 2016	23	31
	Novembre 2024	08	

Les carottes prélevées ont été immédiatement conditionnées dans des étuis en papier, ce qui a permis de faciliter leur transport et de réduire significativement les risques de détérioration entre les prélèvements sur le terrain et les analyses en laboratoires. Enfin, les cavités résultant du carottage ont été colmatées avec du mastic à bois, garantissant ainsi une meilleure protection des arbres échantillonnés.



Figure 1.5. Extraction d'une carotte d'un cèdre de l'Atlas à TAK (photo : S. Slimani).

1.2.2. Préparation des échantillons

Les échantillons ont été laissés sécher progressivement à l'air libre, à l'intérieur de leurs étuis, afin de prévenir l'apparition de fissures sur les surfaces destinées à l'analyse. Une fois secs, ils ont été fixés à l'aide de la colle à bois sur des supports en bois rainurés, puis soigneusement ponçés. Le ponçage a été réalisé manuellement en utilisant du papier abrasif à grain grossier, puis en affinant progressivement avec de grains de calibres de plus en plus fins. Cette approche vise à améliorer la lisibilité des cernes annuels de croissance (Figure 1.6), conformément aux recommandations de Yamaguchi et Brunstein (1991).



Figure 1.6. Surfaces de deux carottes ponçées après montage sur des supports en bois rainurés : en haut, l'échantillon 24B d'un cèdre de l'Atlas du mont Takoucht, caractéristique des résineux, avec un cerne dont la limite est déterminée par un bois d'été sombre ; en bas, l'échantillon 28B d'un chêne zéen du massif de l'Akfadou, caractéristique des feuillus caducifoliés avec un bois à zones poreuses (gros vaisseaux conducteurs du bois de printemps) suivies de zones compactes (bois d'été) (captures sous CooRecorder 9.8.1 : S. Slimani).

1.2.3. Datation et établissement des chronologies maîtresses

1.2.3.1. Datation et interdatation

L'année de formation du dernier cerne complet sous l'écorce des arbres sondés à TAK, ISEQA, ISEQC est 2023, car ayant été carottés au printemps, donc au début de la saison de croissance, au moment où le cerne de l'année 2024 est incomplet. Le dernier cerne daté pour AKF est 2024, car la campagne d'échantillonnage a eu lieu en novembre, en pleine période de dormance, avec le dernier cerne complètement formé.

La datation des échantillons recueillis a été effectuée par un simple comptage à partir du dernier cerne daté sous l'écorce en direction de la moelle. La datation visuelle des carottes a été consolidée en faisant appel à la méthode *Skelton* plot, qui est basée sur l'identification des cernes diagnostiques (ou caractéristiques), selon les techniques largement éprouvés en dendrochronologie décrites par Douglass (1946) et Stokes et Smiley (1996).

L'interdatation des échantillons a permis de s'assurer du bon calage chronologique des séries élémentaires (Lebourgeois et Mérian, 2012). Cette méthode constitue le meilleur moyen de vérifier l'agencement synchrone des séries chronologiques afin de corriger d'éventuelles erreurs de datation, dues notamment aux cernes absents et à la présence de faux cernes, et d'assigner à chaque cerne de croissance l'année exacte de formation (Douglass, 1939 ; Fritts, 1976).

1.2.3.2. Mesure des largeurs des cernes de croissance

La mesure des largeurs des cernes de croissance des échantillons de la première campagne d'échantillonnage a été réalisée sous VELMEX (Velmex Inc. 2016), un système de mesure constitué d'une table micrométrique, associé à un programme de numérisation (enregistreur) sous Matlab. Les mesures sur les carottes recueillies lors de la campagne 2024 ont, quant à elles, été réalisées en utilisant un système d'imagerie numérique : dans un premier temps, les carottes ont été numérisées avec un scanner à haute définition. Les images obtenues ont été ensuite utilisées pour la datation et mesure des cernes de croissance sous le logiciel CooRecorder 9.8.1 (Larson, 2005). Cette technique a l'avantage de pouvoir réaliser la datation et la mesure des largeurs des cernes de croissance simultanément.

Les mesures des largeurs des cernes annuels de croissance ont été effectuées avec une précision de l'ordre de 0.01mm sous les deux systèmes utilisés.

1.2.3.3. Validation statistique de l'interdatation

Le contrôle statistique de la qualité de l'interdatation a été effectué sous le programme COFECHA (Holmes, 1983) et CDendro (Larson, 2005). Cette procédure vérifie la fiabilité de l'interdatation en corrélant les segments successifs d'une série élémentaire donnée (d'une carotte donnée) avec une chronologie de référence issue des séries élémentaires restantes. La longueur du segment de cernes de croissance utilisé est de 50 ans. Pour un recouvrement de 50 % à chaque étape de vérification, les segments successifs sont décalés de 25 ans. Les résultats fournissent, entre autres, la liste d'éventuels cernes absents par séries chronologiques, un tableau récapitulatif des corrélations par segments de chaque séquence de chaque série avec la chronologie maîtresse, ainsi que les problèmes potentiels de datation, traduits par une faible corrélation.

Par ailleurs, il y a lieu de signaler que ces deux logiciels constituent avant tout des outils statistiques d'aide à la décision. Ainsi, les modifications ne concernent pas automatiquement tous les problèmes de datation signalés. La correction ne doit être apportée qu'après vérification et confirmation d'une erreur réelle sur le bois.

1.2.3.4. Standardisation des profils de croissance

La standardisation est une étape clef du traitement des séries dans la construction d'un jeu de données de croissance (Lebourgeois et Mérian, 2012). Elle nous permet d'ajuster et d'éliminer, ou du moins minimiser, les effets et tendances non liés à la variation climatique (Cook, 1985), tels que les signaux liés à l'âge de l'arbre et les perturbations (Fritts, 1976).

La standardisation des chronologies brutes, qui sont des séries de largeurs de cernes de croissance mesurées (en mm), est réalisée sous le programme ARSTAN (Cook, 1985 ; Cook et Holmes, 1999) en utilisant la fonction spline cubique de lissage (polynomiale) sur une fenêtre de 32 ans. Dans un premier temps, cet ajustement établit une courbe théorique avec des valeurs de largeurs de cernes de croissance prédites. Ensuite, chaque valeur réelle (mesurée) est divisée sur la valeur correspondante de la courbe théorique (prédite). Ainsi, les chronologies individuelles des mesures de largeurs de cernes de croissance de départ sont transformées en série d'indices de croissance élémentaires sans tendance (stationnaire) de dimension uniforme, d'une variabilité relativement homogène dans le temps et avec des valeurs oscillant autour d'une moyenne de l'ordre de « 1 » (Fritts, 1976 ; Lebourgeois et Mérian, 2012). Enfin, le calcul sur une moyenne robuste à double pondération, qui est moins affectée par les valeurs aberrantes que la moyenne arithmétique (Cook et Kairiukstis, 1990), a été utilisée afin d'établir une chronologie moyenne (chronologie de référence ou encore

chronologie maîtresse) pour chaque site d'étude à partir de toutes les chronologies individuelles standardisées.

La version Windows du programme ARSTAN génère un fichier de sortie avec quatre chronologies maîtresses pour chaque site (Cook et Krusic, 2005) : une chronologie brute (série de mesures réelles des largeurs de cernes de croissance) et trois chronologies standardisées (valeurs d'indices de croissance au lieu des mesures des épaisseurs d'indices de croissance), qui sont la chronologie STD (Standard), la chronologie résiduelle (RES) et la chronologie ARS (Asrtan), caractérisées avec un niveau d'ajustement de plus en plus élevé.

Souvent utilisée dans l'analyse des indices de résilience (Jetschke *et al.*, 2019 ; Van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2021 ; Buras *et al.*, 2022 ; Van der Maaten *et al.*, 2024), c'est la chronologie STD qui a été utilisée dans la présente étude.

1.3. Analyses statistiques

1.3.1. Caractérisation de la donnée dendrochronologique

Pour caractériser les chronologies moyennes standard des quatre sites d'étude nous avons utilisé quatre paramètres principaux : *i*) la sensibilité moyenne, *ii*) l'intercorrélation moyenne, *iii*) la variance exprimée par le premier vecteur propre (CP1) et *iv*) le signal exprimé dans la population (ESP : *expressed population signal*).

Selon Fritts (1976), la sensibilité moyenne (SM) mesure le changement relatif moyen entre les cernes annuels adjacents, fournissant une estimation de l'impact des fluctuations climatiques sur la largeur des cernes à court terme. La sensibilité S_x est calculée en considérant la différence relative en valeur absolue entre deux indices de croissance successifs selon la formule suivante :

$$S_x = 2|I_{t+1} - I_t| / (I_{t+1} + I_t)$$

Où I_t et I_{t+1} sont les valeurs des indices de croissance adjacents considérés.

L'intercorrélation moyenne considérée dans cette étude est exprimée, pour chaque site, par le coefficient de corrélation de Pearson entre toutes les séries individuelles (toutes les carottes datées).

Dans une analyse en composante principale (ACP), la CP1 exprime le plus fort pourcentage de la variance totale d'un nuage de points. Les séries étant standardisées, la variance du premier vecteur propre reflète donc la qualité du signal climatique contenu dans les cernes de croissance.

L'EPS constitue aussi un très bon paramètre pour quantifier la force du signal commun entre les séries individuelles (Lebourgeois et Mérian, 2012). Il évalue la robustesse des chronologies utilisées dans le cadre d'une analyse dendroclimatique selon la formule suivante :

$$EPS_i = r_i / (r_i + ((1 - r_i) / t))$$

Où r_i est la corrélation moyenne entre les séries individuelles d'indices de croissance des t arbres échantillonnés pour un site donné. Elle varie entre 0, lorsque les séries individuelles sont strictement indépendantes entre elles, et 1, lorsque les t arbres sont identiques. La valeur $1 - r_i$ correspond au bruit. Ainsi, l'EPS quantifie la force relative du signal commun r_i par rapport au signal total (signal commun + bruit).

La longueur des chronologies STD retenues pour nos analyses est basée sur la période couverte par une valeur $EPS \geq 0,85$, un seuil couramment utilisé pour admettre la bonne représentativité de la chronologie moyenne (Wigley *et al.*, 1984).

Par ailleurs, une ACP et une matrice de corrélation ont été réalisées entre les chronologies STD afin d'analyser la variance commune de la croissance, due à la variabilité climatique, via l'estimation du degré de synchronisation entre les patrons de croissance établies pour les quatre sites d'étude.

1.3.2. Identification des années caractéristiques

Le logiciel R (R Core Team, 2025) est depuis quelques années largement utilisé en dendrochronologie pour importer, standardiser et analyser des séries de cernes de croissance.

L'identification des années caractéristiques (PYs) a été effectuée en utilisant le package *pointRes* (Van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2015, 2021), qui fait appel aux packages *dplR* (Bunn, 2008) et *ggplot2* (Wickham, 2016 in Van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2021).

La fonction *treeMean* a été utilisée afin de considérer l'arbre comme chronologie individuelle, en prenant en considération la moyenne sur les deux carottes sondées sur un même sujet. Ensuite, la fonction *detrend* a été utilisée afin de standardiser les chronologies brutes en utilisant une fonction *spline* sur une fenêtre de 32 ans, qui est le même intervalle adopté dans le contrôle statistique de l'interdatation sous COFECHA ainsi que dans la procédure de la standardisation sous ARSTAN. Toutes les analyses suivantes ont été réalisées sur les chronologies STD au seuil EPS 0.85.

Les méthodes d'identification des PYs les plus utilisées (Jetschke *et al.*, 2019), citées dans l'introduction, ont été testées sur les quatre chronologies STD établies.

D'un côté, les quatre chronologies affichent très peu d'années caractéristiques, notamment celles communes sur différents sites, avec les méthodes utilisant la normalisation sur une moyenne mobile, proposées par Cropper (1979) et (Neuwirth *et al.*, 2007), ainsi que celle reposant sur le changement brusque de la croissance (Schweingruber *et al.*, 1990). D'un autre côté la méthode utilisant la transformation en Z sur l'ensemble de la chronologie établie pour un site donné (Qin *et al.*, 2011; Scharnweber *et al.*, 2013; Simon et Lena, 2016) fournit un nombre très élevé d'année caractéristiques.

Ainsi, la méthode qui s'adapte le mieux à la présente étude est celle se basant sur le calcul de la tendance interannuelle moyenne (*Interval Trend*) (Schweingruber *et al.*, 1990 ; Jetschke *et al.*, 2019). En effet, cette méthode permet de détecter un nombre de PYs assez élevé et dont le résultat est assez comparable à celui fourni dans le *skeleton plot* généré dans le contrôle statistique de l'interdatation par COFECHA. Par ailleurs, étant une méthode d'analyse statistique interannuelle, elle a aussi l'avantage de n'exclure des calculs que le cerne de la première année de la chronologie, permettant ainsi d'inclure les cernes des dernières années et d'appréhender la variabilité climatique survenu sur cette période. Ce que la plupart des méthodes ne permettent pas.

Cette méthode utilise une fonction qui permet de calculer la variation de la croissance entre deux années consécutives pour chaque série individuelle (arbre) et définit la tendance interannuelle moyenne pour chaque site en calculant l'intervalle caractéristique tel décrit par Schweingruber *et al.* (1990) : une année est considérée comme « caractéristique négative » (ou « caractéristique positive ») si le pourcentage des arbres affichant une tendance de diminution (ou d'augmentation) de la croissance excède un certain seuil. Par défaut, dans le package *pointRes*, ce seuil est fixé à 95 % des arbres échantillonnés. Néanmoins (Jetschke *et al.*, 2019) rapportent que différentes études se sont basées sur un seuil variant entre 75 et 100 % des arbres carottés. Dans la présente étude, la détermination des PYs repose sur la détection de tout intervalle caractéristique négatif ou positif sur au moins 85 % des arbres considérés dans l'analyse. Ce seuil permet l'identification d'un bon nombre d'années caractéristiques communes sur au moins sur trois des quatre sites échantillonnés. Ce qui permet une analyse comparative fiable.

1.3.3. Calcul des indices de résilience

Exprimant une diminution brutale de la croissance due principalement à un événement de sécheresse, les PYs négatives identifiées dans la section précédente ont été utilisées pour le calcul des indices de résilience.

Dans une actualisation des indices de résilience les plus utilisés, Van der Maaten-Theunissen *et al.* (2021) proposent 10 indices de résiliences. Les paramètres retenus dans le cadre de cette étude sont les indices de *résistance*, de *récupération* et de *résilience* (Lloret *et al.*, 2011), ainsi que la *période de récupération* (Thurm *et al.*, 2016).

Les calculs ont aussi été effectués sous *pointRes* (Van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2015, 2021). La fonction *res.comp* a été utilisée avec trois arguments : le premier indique le type de donnée utilisée (chronologies STD dans ce cas), le deuxième et le troisième fixent les intervalles sur lesquels les calculs sont réalisés. Plusieurs fenêtres y ont été testées. Dans la présente étude, l'analyse repose sur les périodes de quatre ans avant et quatre ans après une PY négative, et la longueur maximale de la période de récupération a été fixée à 15 ans.

La fonction *res.plot* permet d'afficher une figure avec un boxplot pour chaque PY négative dont les calculs impliquent un seuil minimum de cinq arbres. La valeur centrale considérée dans les boxplots est la médiane, qui est plus robuste aux valeurs extrêmes que la moyenne.

Lloret *et al.* (2011) définit les termes impliqués dans le calcul des indices de *résistance*, de *récupération* et de *résilience* comme suit : L'indice de résistance $R_t = Dr / PreDr$, l'indice de récupération $R_c = PostDr / Dr$ et l'indice de résilience $R_s = PostDr / PreDr$. *Dr* (*drought*) représente l'indice de croissance de l'année avec une PY négative déclenchée suite à une sécheresse, *PreDr* (*pre-drought*) correspond à celui de l'année précédant la sécheresse et *PostDr* (*post-drought*) à celui de l'année suivant la sécheresse. Comme cité précédemment, dans notre cas *PreDr* et *PostDr* correspondent à une moyenne de l'indice de croissance sur quatre années consécutives avant et après l'année de la sécheresse respectivement.

Pour l'indice de résistance, une valeur de R_t de 1 indique que la sécheresse n'a pas d'effet sur la croissance (résistance complète). Plus R_t diminue et plus la perte de croissance est forte, correspondant à une moindre résistance. Pour l'indice de récupération, une valeur de R_c inférieure à 1 correspond à une absence de récupération dans les 4 années considérées, c'est-à-dire que la croissance continue de baisser ou ne repart pas après l'évènement extrême. Seule une valeur supérieure à 1 indique une récupération, c'est-à-dire une croissance qui augmente de nouveau une fois la période de stress passée. Pour l'indice de résilience, les valeurs de R_s égales ou supérieures à 1 correspondent à un retour au niveau de croissance initial (c'est-à-dire niveau avant le stress) ou à une croissance supérieure. Des valeurs inférieures à 1 indiquent la persistance d'une croissance ralentie (Schmitt *et al.*, 2023).

La période de récupération, quant à elle, correspond au temps nécessaire pour qu'un arbre retrouve le niveau de croissance radiale d'avant l'année de la sécheresse (Thurm *et al.*, 2016).

Par ailleurs, pour une meilleure analyse comparative entre les arbres carottés et entre les sites d'étude, des figures en boxplots ont été réalisées sous *ggplot2* pour les PYs communes au moins sur trois des quatre chronologies établies.

Chapitre II
Résultats et Discussion

Chapitre II

Résultats et Discussion

2.1. Caractéristiques principales des chronologies établies

Les résultats l'interdatation sous COFECHA sont présentés dans le tableau 2.1 et la figure 2.1.

Tableau 2.1.Caractéristiques principales des chronologies brutes générées sous COFECHA.

Site	Période (années)	Longueur moyenne des séries (années)	Nombre d'arbres datés (carottes)	Nombre de cernes absents
TAK	1565-2023 (459)	212,6	28 (55)	23
ISEQC	1623-2023 (401)	195,7	28 (52)	00
ISEQA	1583 2023 (441)	184,8	25 (47)	00
AKF	1833 2024 (192)	113,1	31 (64)	00

Les chronologies établies pour TAK, ISEQC et ISEQA sont d'une longueur assez comparable (Tableau 2.1). La plus longue série a été établie à TAK. Elle repose sur 28 arbres datés (55 carottes), couvre une période de 459 ans, de 1565 à 2023, avec une longueur moyenne des séries individuelles de 212,6 ans. La plus courte chronologie a été établie à AKF. Malgré un nombre d'arbres carottés (31) et d'échantillons (64) supérieur, cette série ne couvre que les dernières 192 années, de 1833 à 2024, avec une longueur moyenne des chronologies individuelles de 113,1 ans. Cela dit, il y a lieu de signaler que les arbres sondés à AKF sont aussi âgés ; mais le bois de beaucoup d'arbres échantillonnés n'est pas exploitable sur tout le diamètre du tronc à cause de son état de dégradation vers le cœur. D'ailleurs un bon nombre de sujets âgés présentent un tronc creux à partir de quelques centimètres d'épaisseur (échantillons non retenus). Ceci serait principalement dû aux conditions d'humidité du site, probablement à cause de sa proximité d'un plan d'eau. Ce qui favorise la croissance de champignons comme les polypores, observés sur plusieurs arbres à AKF. Ces derniers sont souvent saprophytes, se nourrissant du bois mort, laissant l'arbre avec un tronc creux, notamment chez les caducifoliés (Suominen *et al.* (2015).

En outre, les cernes absents n'ont été identifiés que sur la chronologie maîtresse de TAK (23 cernes absents). Ceci peut être principalement justifié par le fait que le cèdre de l'Atlas (un résineux) est plus sensible à la variabilité climatique que les chênes impliqués dans cette études (des feuillus caducifoliés). A cet effet, Carnicer *et al.* (2013) rapportent des

réponses contrastées entre les angiospermes et les gymnospermes à la variabilité climatique. Ruiz-Benito *et al.* (2017) précisent encore le fait que les conifères soient plus sensibles au changement climatique que les caducifoliés. Cette forte présence des cernes absents dans les chronologies du cèdre de l'Atlas a également été rapportée par Kherchouche *et al.* (2012 et 2013) pour les cédraies des Aurès ainsi que par Slimani (2014) pour d'autres peuplements du cèdre de l'Atlas des Aurès et du Djurdjura.

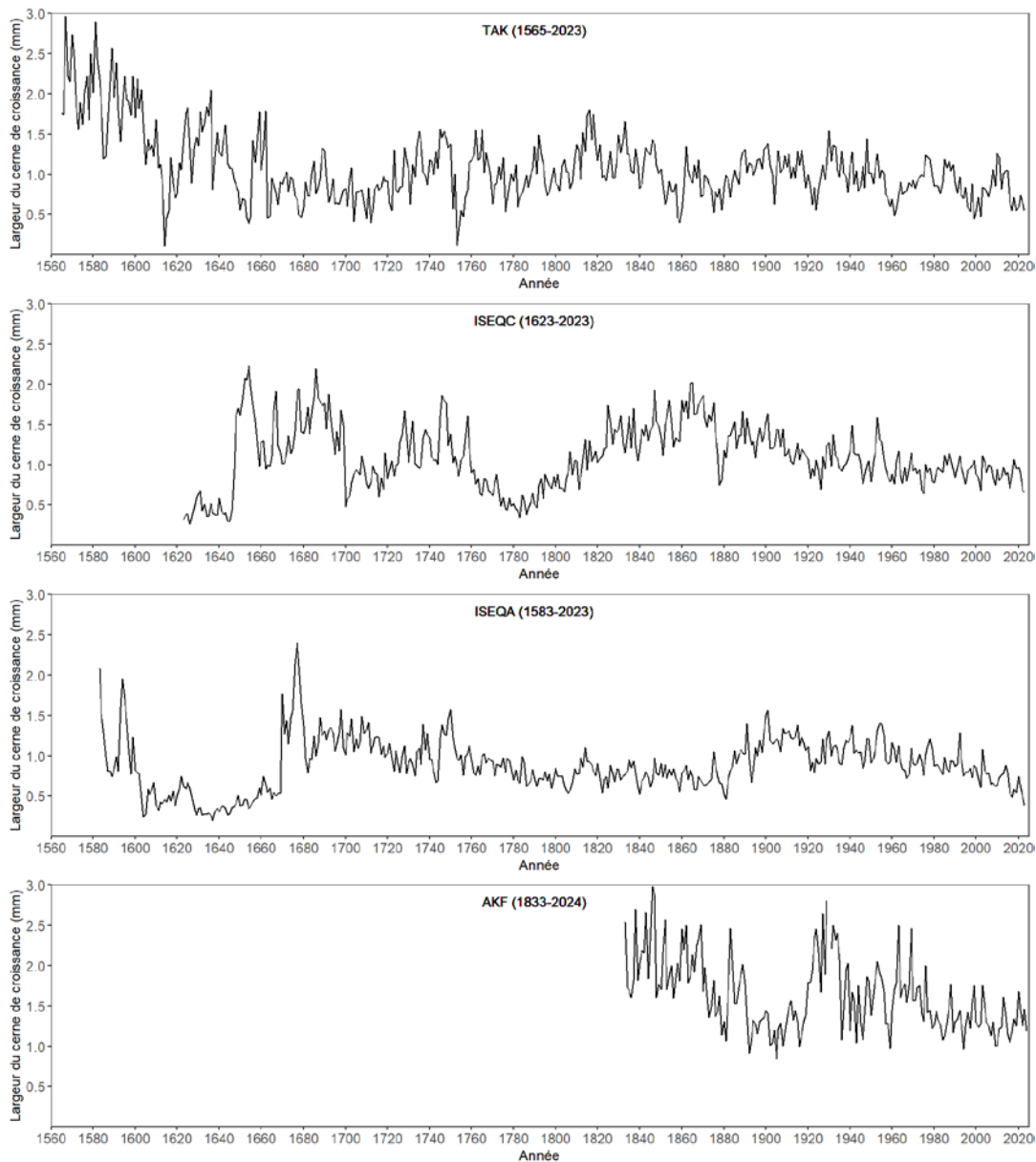


Figure 2.1. Chronologies brutes établies pour les quatre sites d'études.

La figure 2.1 illustre l'évolution de l'épaisseur moyenne des cernes annuels de croissance pour les quatre chronologies maîtresses brutes établies. Les courbes des quatre séries affichent clairement une forte tendance d'une haute variabilité de la croissance. Ceci est dû au fait que la formation d'un cerne de croissance est soumise à l'influence d'une

combinaison de divers facteurs, aussi bien naturels qu’anthropiques (Cook,1985). En effet, l’épaisseur d’un cerne constitue un indicateur du bilan annuel de la croissance radiale qui englobe des signaux dus à la variabilité climatique, ainsi que d’autres influences, dues entre autres, à l’âge et aux perturbations aussi bien endogènes (compétition, pathogénie, fertilité des sols, etc.) que exogènes (érosion, feu, défrichement, etc.) aux peuplements (Nicault *et al.*, 2010). L’effet lié à l’âge est apparent dans nos chronologies, notamment sur la tendance globale de la courbe de TAK, qui s’explique par le fait que les jeunes arbres produisent généralement des cernes plus large et qu’avec l’avancée en âge, la croissance radiale diminue progressivement avant d’atteindre une phase de stabilisation (Fritts, 1976), qui est aussi exprimées nettement sur les derniers siècles des trois autres chronologies.

Les principales caractéristiques des chronologies STD au seuil EPS de 0,85 des quatre sites d’étude sont affichées dans le tableau 2.2.

Les périodes de fiabilité obtenues pour une analyse dendroclimatique varie d’environ deux à près de trois siècles, couvrent les périodes 1731-2023 pour TAK, 1759-2023 pour ISEQC, 1778-2023 pour ISEQA et 1833 2024 pour AKF.

Tableau 2.2.Caractéristiques principales des chronologies STD.

Site	Période	Chronologie totale			Intervalle commun	
		ET ^a	SM ^b	EPS \geq 0.85 ^c	r ^d	% CPI ^e
TAK	1565-2023	0,21	0,21	1731-2023	0,24	27,36
ISEQC	1623-2023	0,16	0,14	1759-2023	0,38	40,89
ISEQA	1583 2023	0,17	0,14	1778-2023	0,38	39,68
AKF	1833 2024	0,17	0,17	1833-2024	0,37	39,01

^a Ecart type, ^b Sensibilité moyenne, ^c Période sur laquelle l’EPS \geq 0,85, ^d corrélation moyenne entre les chronologies individuelles, ^e Variance de la première composante principale des chronologies individuelles sur l’intervalle commun.

TAK affiche la valeur de la sensibilité moyenne la plus forte (SM = 0,21). Slimani (2014) rapporte des valeurs similaires pour deux peuplements du versant sud du Djurdjura. Cette valeur est suivie par celle de AKF (SM = 0,17) et celles de ISEQC et ISEQA (SM = 0,14). Ceci confirme ce qui est cité ci-dessus par rapport à la forte plus forte sensibilité du cèdre de l’Atlas à la variabilité climatique par rapport aux deux chênes caducifoliés échantillonnés. A cet effet, Bréda *et al.* (2004) soulignent le fait que les résineux sont souvent plus affectés par la sécheresse atmosphérique, ces derniers possédant des stratégies

d'évitement pour faire face à un déficit hydrique important, telles que la chute précoce des feuilles. Par ailleurs cette différence peut également s'expliquer par la variation de l'humidité entre les trois montsd'étude. En effet, faisant face à la méditerranée les peuplements du mont d'ISSEK (ISEQC et ISEQA) bénéficient davantage de l'humidité de l'air marin que la cédraie de TAK et les chênes de l'AKF. A cela s'ajoute le facteur édaphique cité dans le chapitre précédent, faisant état d'un sol plus ou moins profond qui caractérise les aires d'échantillonnage de ces deux sites. Ces facteurs favorisant la disponibilité en eaux aux arbres carottés à ce niveau, pourraient largement justifier la faible valeur de leur sensibilité moyenne.

Les résultats montrent aussi que ce sont les sites qui ont les valeurs de l'écart type les plus faibles qui ont enregistré les corrélations moyennes et les variances de la première composante principale des chronologies individuelles sur l'intervalle commun les plus élevées. Les sites des trois feuillus considérés dans cette étude ont enregistré des valeurs de l'écart type relativement faibles allant de 0,16 à 0,17. Ceci reflète l'homogénéité relative des conditions écologiques de ces aires d'échantillonnage, qui ont abouti à des patrons de croissances plus synchronisés entre les arbres carottés, augmentant ainsi la corrélation entre ces séries individuelles, affichant des valeurs de r entre 0,37 et 0,38, et la variance exprimée par la première composante principale entre les chronologies individuelles, avec des valeurs de la CP1 entre 39,01 et 40,89 %. Au contraire, TAK couvre une zone plus étendue, englobant une grande partie du versant nord du mont Takoucht. Ceci a augmenté sensiblement l'hétérogénéité du milieu d'étude, exprimé ici par une plus forte valeur de l'écart type (ET = 0,21). Ainsi, malgré sa plus forte sensibilité à la variabilité climatique, TAK affiche des valeurs de la corrélation moyenne ($r = 0,24$) et de la variance de la première composante principale des chronologies individuelles (CP1 = 27,36 %) relativement faibles par rapport à celles des chênes des monts voisins.

Les courbes des indices de croissance des chronologies STD au seuil EPS de 0,85 sont présentées dans la figure 2.2. L'allure de ces courbes détendancées, oscillant autour d'une moyenne de l'ordre de 1, montrent que la procédure de la standardisation a éliminé, ou du moins minimisé, les effets non désirables tels que ceux liés à l'âge de l'arbre, dont la tendance est bien marquée sur les courbes des chronologies maitresses brutes (Figure 2.1).

Les indices de croissance les plus élevés, correspondant aux trois années les plus humides, ont été enregistrés, respectivement en valeurs décroissantes, en 1862, 1766 et 1765 à TAK, en 1953, 1941 et 1772 à ISEQC, en 1975, 1992 et 2020 à ISEQA et en 1883, 1969 et 1963 à AKF.

Les valeurs des indices de croissance les plus faibles, correspondant aux trois événements extrêmes les plus secs, ont été identifiés, respectivement en valeurs décroissantes, en 1753, 1754 et 1756 à TAK, en 1878, 1879 et 1926 à ISEQC, en 1881, 1880 et 1893 à ISEQA et en 1836, 1959 et 1892 à AKF.

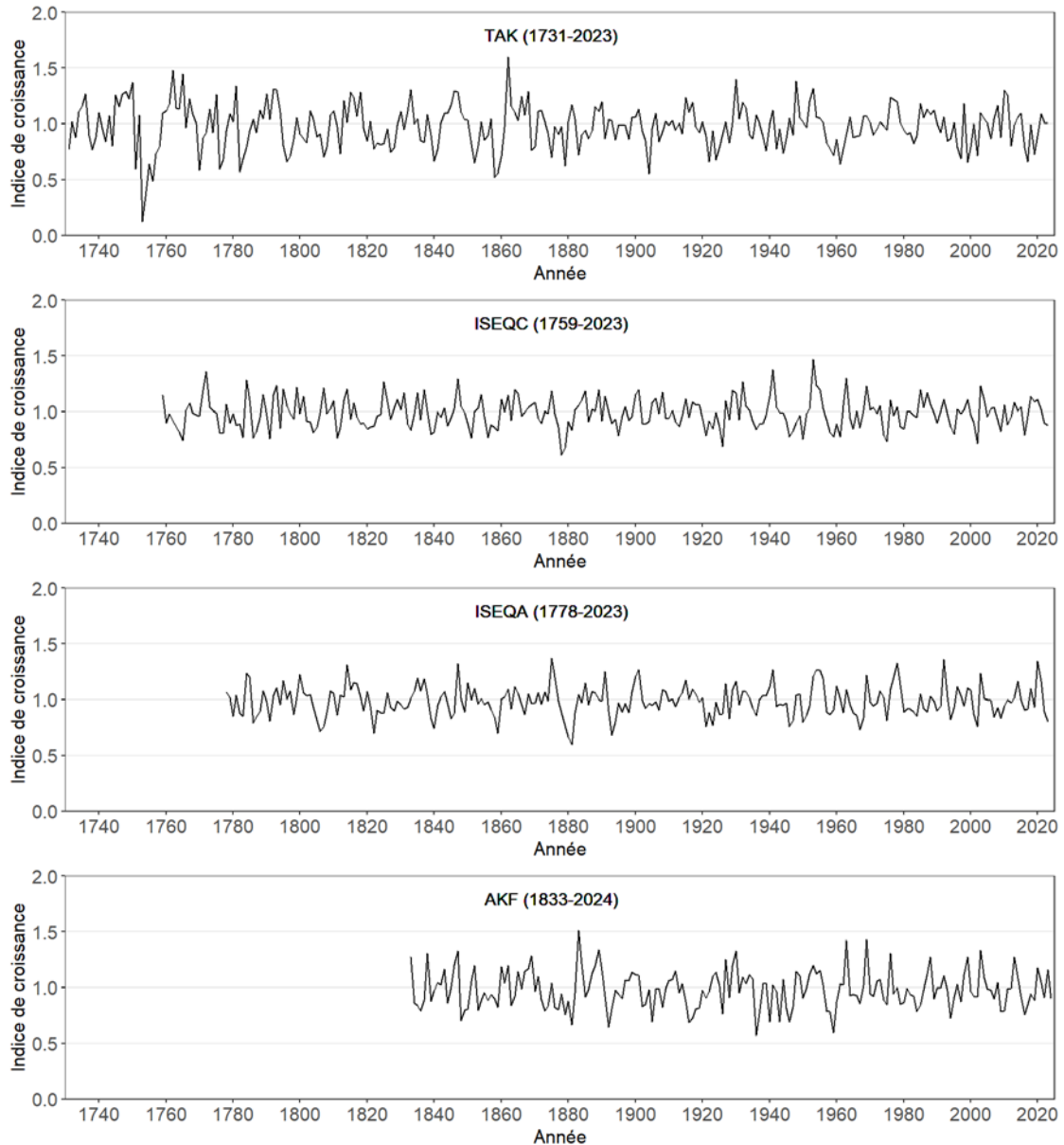


Figure 2.2. Chronologies STD au seuil EPS de 0.85 pour les quatre sites d'études.

Cette différence dans la détection des événements climatiques les plus extrêmes dans les cernes de croissance des quatre chronologies établies seraient dues, comme signalé précédemment, aussi bien à la différence de la sensibilité des espèces forestières étudiées à la variabilité climatique qu'aux conditions écologiques propres aux sites considérés, notamment topographiques et édaphiques.

Le plan 1-2 de l'analyse en composantes principales impliquant les chronologies STD établies pour les quatre sites d'étude sur leur période commune 1833-2023 est présenté dans la figure 2.3. Les deux axes expliquent près 75 % de la variance totale de la croissance radiale des quatre séries dendrochronologiques, ce qui permet une bonne interprétation dendroclimatique.

L'axe 1 rassemble tous les sites d'étude dans sa partie positive, reflétant le fait que les peuplements étudiés se développent dans des conditions climatiques plus au moins similaires. En effet, comme signalé dans la synthèse climatique (chapitre précédent), les quatre sites d'étude sont situés dans le même étage bioclimatique. Ce résultat est encore plus renforcé par ceux consignés dans la matrice des corrélations (Tableau 2.3) qui affichent des corrélations significatives entre toutes les chronologies établies.

Le deuxième axe, quant à lui, divise ces sites en deux groupes, isolant TAK, qui est un résineux, des trois autres sites de feuillus caducifoliés. Cette discrimination justifie une fois de plus le facteur interspécifique, qui met en évidence la différence de la sensibilité entre les angiospermes et les gymnospermes vis-à-vis de la variabilité climatique.

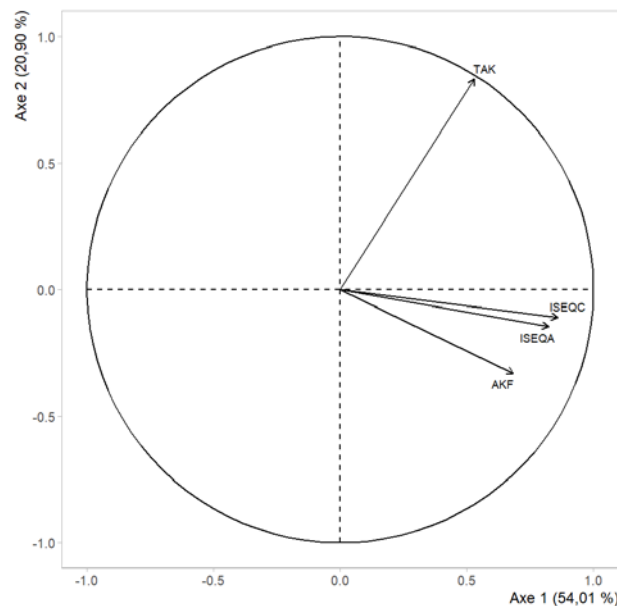


Figure 2.3. Analyse en composantes principales : plan 1-2 des chronologies STD (variables).

En outre, le tableau 2.3 montre que la plus forte corrélation entre les séries d'indice de croissance est obtenue entre ISEQC et ISEQA ($r = 0,64$, $n = 191$, $p = 0,000$). Ceci est principalement dû au fait qu'il s'agit de deux chronologies de deux chênes caducifoliés obtenues sur deux aires d'échantillonnages qui se chevauchent sur un même mont. La plus

faible corrélation, qui est restée aussi hautement significative, est enregistrée entre TAK et AKF ($r = 0,19$, $n = 191$, $p = 0,008$). Ceci est dû au fait que, dans ce cas, nous avons un feuillu (chêne zéen) et un résineux (cèdre de l'Atlas) et que ces deux peuplements sont les plus distants sur le terrain (Figure 1.1). La deuxième meilleure corrélation est affichée entre AKF et ISEQC ($r = 0,41$, $n = 191$, $p = 0,000$), deux peuplements de chêne zéen, qui, malgré la distance qui les sépare, confirment l'importance du caractère génétique (essence forestière) dans la synchronisation des patrons de croissance, donc la réponse commune vis-à-vis de la variabilité climatique.

Tableau 2.3. Matrice des corrélations entre les quatre chronologies STD sur leur période commune (1833-2023) au seuil EPS 0.85. Les valeurs sont le coefficient de corrélation de Pearson, suivi de la valeur-p.

	TAK	ISEQC	ISEQA	AKF
ISEQC	0,31 0,000			
ISEQA	0,27 0,000	0,64 0,000		
AKF	0,19 0,008	0,41 0,000	0,38 0,000	

2.2. Analyse des années caractéristiques

L'identification des années caractéristiques (PYs) a été effectuée avec la méthode de l'intervalle interannuel moyen. L'ensemble des PYs positives et négatives déterminées pour chacun des quatre sites d'étude sont présentées dans la figure 2.4. Une PY positive est définie par une augmentation significative de la croissance radiale en réponse à un événement humide, tandis qu'une PY négative correspond à une diminution de la croissance suite à un événement sec.

Au total, 84 PYs (29% du total des années considérées) ont été identifiées à TAK sur la période 1732-2023 (292 ans), dont 46 étaient positives et 38 négatives. Sur la période 1760-2023 (264 ans) ISEQC a enregistré 83 PYs (31%), avec 40 PYs positives et 43 négatives. Durant la période 1779-2023 (245 ans), 77 PYs (31 %) ont été recensées sur le site ISEQA, dont 37 PYs positives et 40 négatives. Enfin, 82 PYs (43 %) ont été identifiées sur la période 1834-2024 (191 ans) que couvre la chronologie de AKF, avec 40 PYs positives et 42 négatives.

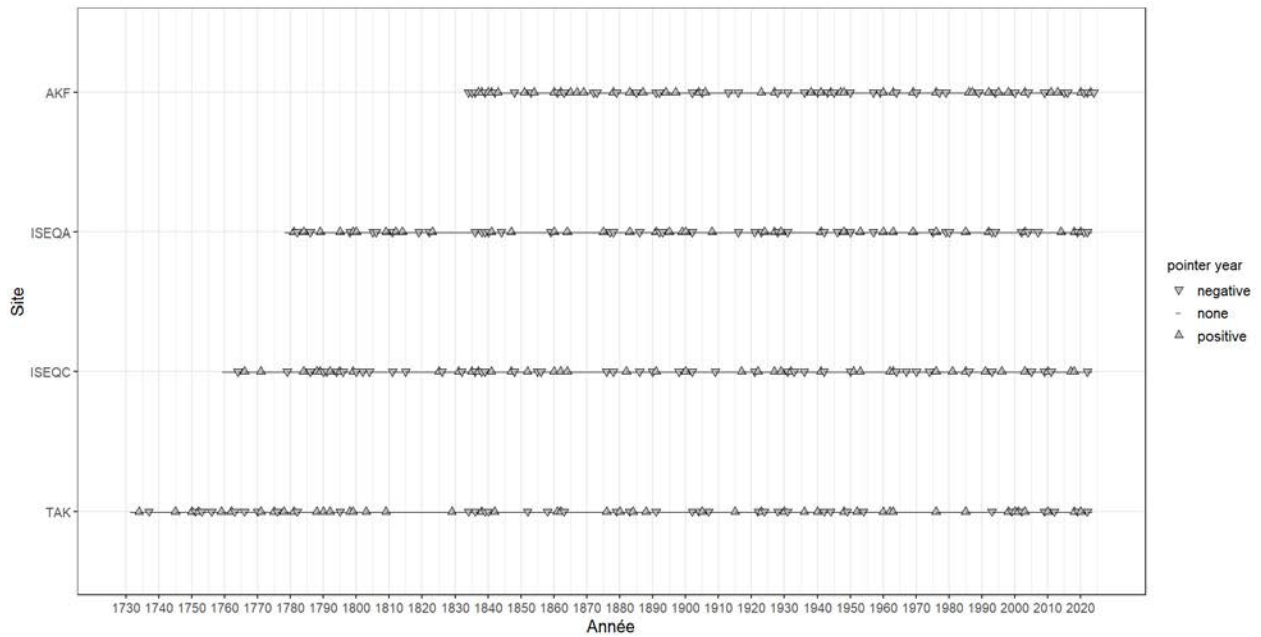


Figure 2.4. Diagramme à points des années caractéristiques (*Pointer Years*) identifiées sur les quatre chronologies établies au seuil EPS 0.85.

Le taux le plus élevé en années caractéristiques à AKF (43 %) serait principalement dû au fait qu’il s’agit du seul site localisé sur le versant sud.

Contre toute attente, c’est TAK qui a enregistré les taux les plus faibles aussi bien en PYs (29 %) qu’en PYs négatives (13 %), malgré que les résineux sont réputés être plus sensibles à la variabilité climatique que les feuillus (Bréda *et al.*, 2004, Carnicer *et al.*, 2013 ; Ruiz-Benito *et al.*, 2017). En plus de sa situation topographique sur le versant nord, et comme mentionné ci-dessus, le fait que l’aire échantillonnée est plus vaste, avec notamment un gradient altitudinal plus important qu’au niveau des autres sites aurait diminué sensiblement la synchronisation entre les patrons de croissance des arbres échantillonnés à ce niveau, diminuant ainsi le nombre de PYs identifiées sur au moins 85 % des arbres sondés.

Par ailleurs, le nombre important des PYs positives caractérisant les quatre chronologies reflètent les conditions climatiques de la région d’étude, qui est l’une des plus arrosées du pays.

Un premier pic en PYs communes au moins sur deux sites (Figure 2.4 et annexes 1 et 2) a marqué la période allant de la fin des années 1830 au début des années 1840. Un deuxième épisode a été enregistré entre la fin des années 1870 au début des années 1890. Il y a lieu de signaler que deux PYs négatives successives communes sur deux sites, enregistrées en 1878 et 1879, ont coïncidé avec un épisode de dépérissement forestier en Algérie, dû à une sécheresse sévère, notamment dans les massifs de l’Aurès, du Belezma et du Djurdjura

(Lapie, 1909 ; Boudy, 1950 *in* Abdessemed, 1981). Un troisième pic de PYs communes au moins sur deux sites a été identifié entre le début des années 1940 et le début des années 1960. Après une période de relative accalmie observée entre la deuxième moitié des années 1960 et la fin des années 1980, un autre pic a, dans l'ensemble, marqué les trois dernières décennies (à partir des années 1990). Des PYs négatives communes au moins sur deux sites, nous signalons celles identifiées en 1993, 1994 et 2002, qui coïncident avec un autre épisode de dépérissement forestier en Algérie, avec un impact plus notable dans l'Atlas saharien (Touchan *et al.*, 2010; Kherchouche *et al.*, 2012, 2013 ; Slimani, 2014 ; Slimani *et al.*, 2014a, 2021a ; Tafer *et al.*, 2022). Ce phénomène est encore signalé un peu partout en Algérie (Slimani *et al.*, 2021b) et s'est même accentué au cours des dernières années, touchant des essences forestières des plus rustiques, à l'image du chêne-liège, du chêne zéen et du chêne afarès (observation de terrain). A cet effet, sur les quatre dernières années d'analyse, nos résultats affichent PYs négatives communes au moins sur deux sites, dont deux successives (2019, 2021 et 2022).

Le seuil utilisé dans la détermination des années caractéristiques (85 % des arbres) a permis d'identifier 13 PYs positives communes au moins sur trois sites, dont 7 (1960, 1963, 1979, 1885, 2003, 2018, 2020), impliquant toutes les années caractéristiques positives détectées sur les quatre sites, sont survenues à partir de 1960. Aussi, un total de 10 PYs négatives communes au moins sur trois sites (1836, 1839, 1902, 1928, 1931, 1942, 1950, 1993, 2009, 2022) ont été identifiées, dont cinq sont communes à toutes les chronologies établies. La moitié de ces années caractéristiques négatives communes au moins sur trois sites a été enregistrée à partir de 1942.

Ainsi, ces résultats confirment la forte variabilité climatique ayant caractérisé la région d'étude, notamment à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle, l'exposant aussi bien à une sécheresse récurrente, exprimée par la fréquence en années caractéristiques négatives, qu'aux épisodes de précipitations torrentielles, reflétés par la fréquence en années caractéristiques positives, accentuant ainsi les risques de phénomènes associés respectifs, tels que les incendies et les inondations. Des résultats similaires ont été rapportés par (Slimani *et al.*, 2014a, 2021a ; Tafer *et al.*, 2022).

2.3. Analyse des indices de résilience

Les annexes 3, 4, 5 et 6 illustrent la variabilité des indices de résilience correspondant aux années caractéristiques négatives pour chacun des sites d'étude. Comme signalé dans la

section précédente, cette analyse repose principalement sur la valeur médiane entre les arbres échantillonnés.

Ces figures mettent en évidence des différences substantielles entre les indices de résilience à la fois entre les quatre sites d'étude, entre les trois espèces carottées et, au cours du temps, au sein d'un même peuplement. TAK affiche la plus forte amplitude de l'indice de résistance (annexes 3), avec une valeur minimale (0,12) enregistrée en 1753 et un maximum (1,14) atteint en 2022. En outre, TAK n'a montré une résistance complète ($R_t \geq 1$) que face aux sécheresses de 1863 et 2022. Une tendance à l'augmentation de la résistance des arbres face à la sécheresse a été observée sur les dernières années. Un résultats similaire a été avancé par Sarmoum *et al.* (2024) pour les cédraies du massif de l'Ouarsenis. A ISEQC, cet indice a varié entre une valeur minimale (0,61) obtenue en 1878 et un maximum (1,09) enregistré en 1826. Ce peuplement de chêne zéen a affiché une résistance complète face à cinq évènements secs (1790, 1826, 1836, 1848, 1993). ISEQA a enregistré ses résistances minimale (0,66) et maximale (1,02) en 1893 et 2004 respectivement, avec une résistance complète sur cinq crises de croissance dues à la sécheresse (1836, 1979, 2004, 2019 et 2021). L'indice de résistance de AKF a varié entre un minimum (0,50) enregistré en 1892 et un maximum (1,12) obtenu en 2021, avec une résistance totale face à trois sécheresses (1961, 2004 et 2021).

A TAK, l'indice de récupération a varié entre un minimum (0,72) obtenu en 1751 et un maximum (1,62) enregistré en 1776, avec une configuration marquée par un nombre important de valeurs aberrantes, correspondant aux indices extrêmes affichés par des arbres ayant une réponse relativement différente par rapport l'ensemble du peuplement (annexe 4). La cédraie de TAK a récupéré totalement dans les quatre années suivant une sécheresse ($R_c \geq 1$) sauf dans six évènements (1751, 1834, 1836, 1931, 1954 et 1993). ISEQC affiche un indice de récupération minimum (0,82) en 1876 et maximum (1,63) en 1950. Ce peuplement n'a pas pu récupérer totalement lors des quatre années suivant la sécheresse sur 17 évènements. A ISEQA, l'indice de récupération minimum (0,70) a été obtenu en 1877 et le maximum (1,47) en 1975. Ce peuplement a récupéré totalement dans les quatre années suivant une sécheresse sauf dans 10 évènements. Enfin, c'est AKF qui a affiché les valeurs minimale (0,87) et maximale (1,76) de l'indice de récupération les plus importantes, enregistrées en 1913 et 1959 respectivement, et avec une récupération totale quatre après la sécheresse sauf sur cinq évènement (1872, 1913, 1977, 2004 et 2015). Par ailleurs, une augmentation de l'indice de récupération plus ou moins nette a été observée sur les dernières décennies, notamment sur les chronologies de TAK et ISEQC.

Les figures des périodes de récupération (annexe 5) affichent les boxplots les plus étalés, reflétant la grande variabilité entre les arbres quant au temps (en années) qui leur est nécessaire pour récupérer d'un événement sec. Plusieurs sujets (représentés par les valeurs aberrantes) ont enregistré une période de récupération dépassant 10 ans, notamment à TAK. Néanmoins, en considérant la valeur médiane, TAK a enregistré la plus courte période de récupération (0,00 : récupération immédiate) pour les PYs 1863 et 2022 et la plus longue (8,29) en 1751, avec seulement trois cas où cette cédraie avait besoin de plus cinq ans pour récupérer totalement (1737, 1751, 1753 et 1836). La période de récupération la plus faible à ISEQC (0,00) a été observée sur trois événements, en 1790, 1826 et 1836, alors que la plus longue (6,44) est survenue en 1933. Cette zénaie a nécessité plus de cinq ans pour récupérer uniquement lors des sécheresses de 1921 et 1933. A ISEQA, le minimum (0,00) a été enregistré en 1836 et 2019 et le maximum (8,14) en 1878. Ce peuplement a nécessité plus de cinq ans pour récupérer lors de quatre sécheresses (1977, 1878, 1942 et 1980). AKF a enregistré la même valeur minimale (0,00) en 1861, 2004 et 2021, mais aussi, comme dans le cas de l'indice de récupération, la période de récupération la plus élevée (10,19), observée pour l'année caractéristique 1872. Cette zénaie a eu besoin de plus cinq ans pour récupérer face aux sécheresses de 1872, 1891 et 1957. Par ailleurs, dans l'ensemble, et malgré la fréquence notable en années sèches signalées dans la section précédente lors des dernières décennies, la période de récupération y est relativement basse notamment à TAK et ISEQC.

Les résultats de l'indice de résilience sont présentés dans l'annexe 6. A TAK, les valeurs varient entre un minimum (0,38) identifié en 1751 et un maximum (1,85) observé en 1756. Les cèdres carottés ont retrouvé leur niveau de croissance initial quatre ans après une sécheresse ($R_s \geq 1$) dans 47 % des cas. Pour ISEQC, la résilience la plus faible (0,78) est survenue en 1876 et la plus forte (1,38) en 1950. Ce peuplement a pu retrouver son niveau de croissance initiale quatre ans après un événement sec dans 21 % des cas. ISEQA a enregistré sa résilience minimale (0,60) en 1878 et sa valeur maximale (1,22) en 1811. Ce peuplement a pu atteindre son niveau de croissance initiale quatre ans après une crise de la croissance dans 35 % des cas. Enfin, la chronologie de AKF a été marquée par une résilience minimale (0,71) enregistrée en 1891 et une valeur maximale (1,19) obtenue en 1950. Cette zénaie a pu retrouver son niveau de croissance initiale quatre ans après une sécheresse uniquement dans 17 % des événements. Ainsi, l'indice de résilience affiche une variabilité importante dans le temps, mais les quatre sites d'étude montrent une tendance plus ou moins nette à l'augmentation sur les dernières décennies. Ceci pourrait être dû au fait que la sécheresse

récurrente ayant caractérisé cette période aurait stimulé la résilience des arbres sondés face aux conditions défavorables.

Dans l'ensemble, si les indices étudiés dépendent de l'intensité d'un évènement sec à l'origine de la diminution substantielle de la croissance radiale, l'influence des conditions climatiques avant et après la sécheresse reste l'élément le plus déterminant. En effet, nos résultats montrent que des années humides avant l'année de la sécheresse (quatre ans dans notre cas) renforcent la résistance des arbres face à la sécheresse ; au contraire, des années sèches fragilisent les arbres et diminuent drastiquement leur résistance. Il y a lieu de signaler que les chronologies utilisées sont les séries STD et que ces dernières ne subissent pas l'élimination de l'autocorrélation lors de la procédure de la standardisation : la rémanence n'étant pas éliminée, l'effet de la formation des cernes $t-4$, $t-3$, $t-2$ et $t-1$ (avant la sécheresse) peut avoir un effet significatif sur la formation du cerne t (PY) (Cook, 1985).

Il en est de même pour l'indice de récupération par rapport aux quatre années suivant un évènement sec, ainsi que pour la période de récupération et l'indice de résilience par rapport aux quatre années avant et après la sécheresse. Dans l'ensemble, la résilience des arbres sondés était d'autant plus élevée que les conditions durant les années précédant et/ou suivant la sécheresse sont favorables à la croissance, aboutissant respectivement à une forte résistance et une récupération rapide. L'intensité du déficit hydrique (Bornot, 2017), la saison durant laquelle survient la sécheresse Bose *et al.* (2021), ainsi que la topographie du site (Kim *et al.*, 2017) peuvent aussi avoir un impact significatif sur la réponse des arbres face à un évènement sec. Ceci rend encore plus difficile cette comparaison, même quand il s'agit de la réponse d'un même arbre dans le temps. A cet effet, dans une étude sur la réponse du pin ponderosa à la sécheresse aux USA, Lloret *et al.* (2011) rapportent une variation sans tendance nette vers l'augmentation ou la diminution de la résilience dans le temps, suggérant que ce genre de fluctuations sont probablement beaucoup plus liées à la variabilité dans l'intensité des épisodes de sécheresse qu'à la variabilité entre les arbres. A cela s'ajoute l'influence des facteurs biotiques, comme les champignons et les insectes, qui peuvent aggraver significativement la crise de la croissance (Bréda et Badeau, 2008 ; Bornot, 2017). En effet, en plus des champignons assez fréquents sur les arbres sondés, la présence de la chenille processionnaire est assez notable sur certains sujets au niveau de la cédraie de Takoucht.

Enfin, pour une meilleure appréciation de l'analyse comparative de la réponse des quatre peuplements étudiés aux évènements secs, nous avons considérées uniquement les 10 PYs négatives détectées au moins sur trois des quatre sites considérés, dont huit cas englobent les trois espèces carottées (Figures 2.5, 2.6, 2.7 et 2.8).

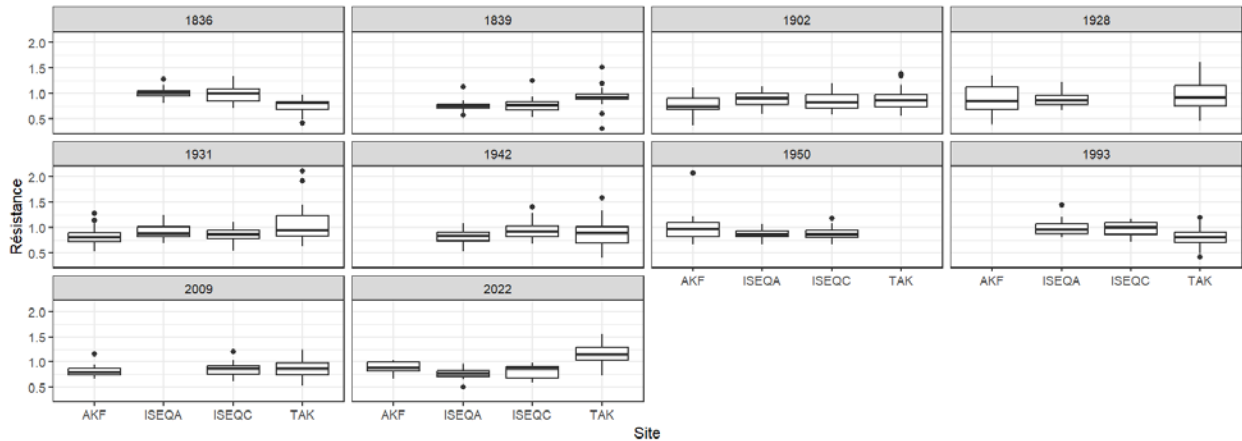


Figure 2.5. Indices derésistance pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.

Dans l'ensemble les arbres des trois espèces échantillonnées ont montré une résistance relativement faible sur les années communes au moins sur trois sites (Figure 2.5) ; seules les sécheresses de 1993 et de 2002 n'ont pas eu un effet notable ($R_t \geq 1$) à ISEQA et TAK respectivement. Au contraire, les quatre sites et trois espèces sondées ont enregistré une bonne récupération, exprimée, dans l'ensemble, par un fort indice de récupération (Figure 2.6). En effet, les peuplements étudiés n'ont affiché une absence de récupération ($R_c < 1$) dans les quatre années suivant une sécheresse qu'en 1836 à TAK et ISEQA, en 1931 à TAK, en 1942 à ISEQC et ISEQA et en 1993 dans les trois sites considérés (TAK, ISEQC et ISEQA), mais assez souvent avec des valeurs de l'indice de récupération proche de 1. Ce résultat est d'autant plus renforcé par des périodes de récupération relativement courtes (Figure 2.7), qui n'ont dépassé, et souvent de peu, les quatre années qu'en 1836 à TAK, 1902 à AKF, 1942 à ISEQC et SEQA et en 1993 à TAK. La résilience des peuplements d'étude est, quant à elle, variable dans le temps, avec une dominance relative de la persistance de la crise de la croissance suite à une sécheresse (Figure 2.8). En effet, le retour au niveau de croissance initial ($R_s \geq 1$) n'a été enregistré qu'en 1928 à AKF, ISEQA et TAK, en 1931 et 1942 à TAK, en 1950 à AKF, ISEA et ISEQC et en 2009 à AKF, ISEQC et TAK.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que l'élément le plus déterminant est représenté par les conditions climatiques avant et après un événement sec, qui sont souvent contrastées malgré la relative proximité des sites d'étude. Néanmoins, dans les rares cas où les conditions sont plus ou moins similaires (du moins en nombre d'évènements secs ou humides avant et après l'année caractéristique négative), ce sont les cèdres carottés à TAK qui se sont montrés les plus vulnérables à la sécheresse que le chêne zéen et le chêne afarès. A titre d'exemple, le cèdre de l'Atlas (TAK) a été le moins résistant à l'événement sec de 1836 devant le chêne zéen (ISEQC) et le chêne afarès (ISEQA) du mont Issek (Figure 2.5) et a

nécessité une plus longue période (6 ans) pour y récupérer (Figure 2.7) et résultant en une plus faible résilience (Figure 2.8), malgré des conditions plus défavorables sur trois des quatre années successives après l'évènement sec à ISEQA. Il en est de même pour l'évènement sec de 1993, où TAK a enregistré une plus longue période récupération (4 ans), malgré des conditions plus défavorables au mont Issek. A cet égard, Gazol *et al.* (2018) notent que les résineux dominant les forêts du climat semi-aride méditerranéen montrent une plus faible résistance à la sécheresse que les feuillus dominant les forêts humides tempérées. Aussi, dans une étude en Asie de l'Est, Byun *et al.* (2013) rapportent que les chênes (*Quercus* ssp.) ont affiché une plus grande résilience vis-à-vis de la récente variabilité climatique par rapport aux résineux. Néanmoins, Bose *et al.* (2021) signalent que si les chênes sont considérés résilients vis-à-vis des sécheresses extrêmes, ils restent vulnérables face aux sécheresses printanières.

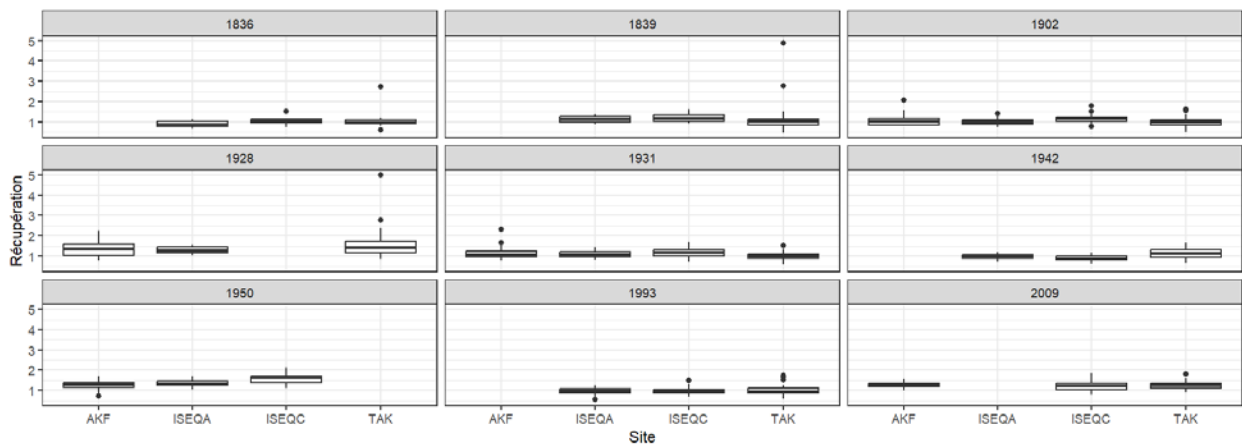


Figure 2.6. Indices de récupération pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.

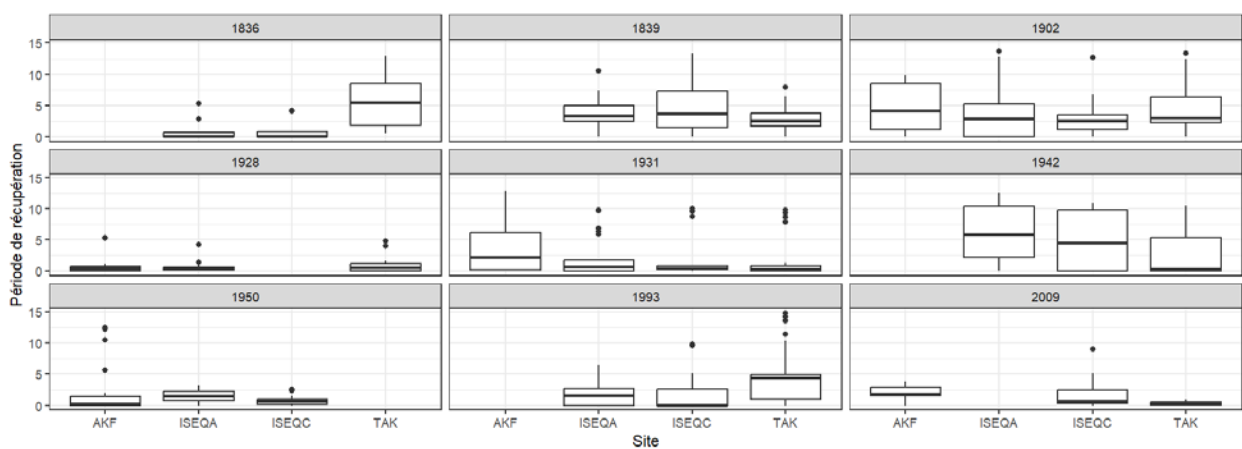


Figure 2.7. Périodes de récupération pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.

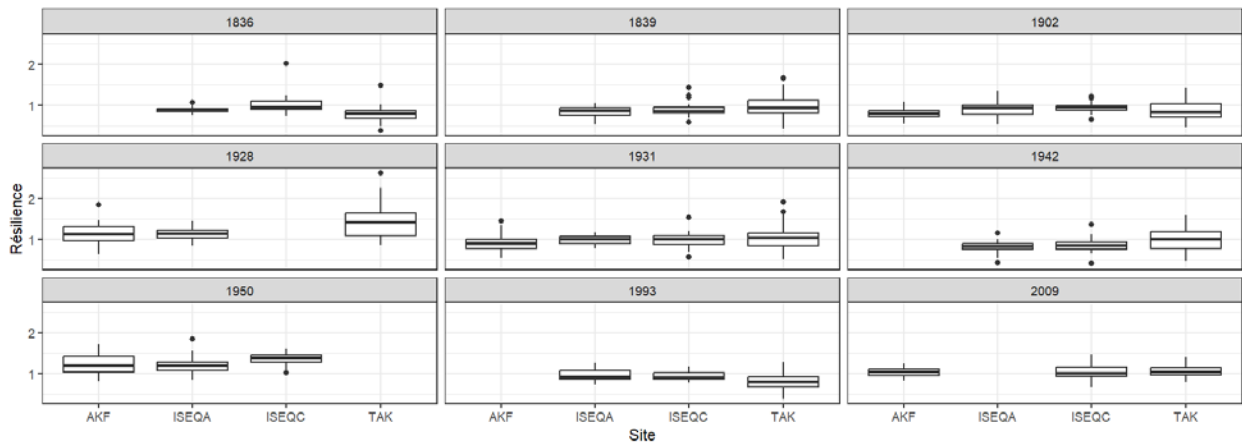


Figure 2.8. Indice derésilience pour les années caractéristiques communes au moins sur trois des quatre sites d'étude.

Par ailleurs, dans l'ensemble, dans des conditions climatiques relativement similaires, la réponse du chêne zéen est légèrement meilleure que celle du chêne afarès. En effet, malgré une plus faible résistance de ISEQC par rapport à ISEQA à l'événement sec de 1902 (Figure 2.5), ISEQC a enregistré un meilleur indice de récupération (Figure 2.5), a nécessité moins de temps de récupération (Figure 2.7) et a montré une meilleure résilience (Figure 2.8), alors que les conditions climatiques étaient plutôt légèrement favorables au site mitoyen de ISEQA. Ceci peut être expliquée par le phénomène de l'édaphisme : le chêne zéen prospère sur les terrains calcaires ainsi que siliceux, il ne pousse bien que sur des sols profonds et perméables (Boudy, 1950 *in* Zidane et Zalouk, 2024), contrairement au chêne afarès qui s'épanouit bien sur des sols argileux et soumis à une hydromorphie temporaire (Meddour, 1993). Ceci peut bien le rendre plus vulnérable aux conditions de sécheresse sévères. A cet effet, Bose *et al.* (2021) rapportent que la résilience des chênes est particulièrement affectée par la sécheresse au sein des sites dont la croissance est faiblement corrélée avec les facteurs climatiques, ce qui est le cas du chêne afares (Zidane et Zalouk, 2024).

Conclusion

Conclusion

La présente étude a été réalisée sur quatre sites forestiers relevant de la conservation des forêts de la wilaya de Béjaïa : La cédraie de Takoucht (TAK), deux peuplements mitoyens de chêne zéen (ISEQC) et de chêne afarès (ISEQA) du mont Issek et un peuplement de chêne zéen du massif de l'Akfadou (AKF).

L'approche dendrochronologique a été utilisée afin d'analyser la réponse à long terme de ces trois essences forestières à la sécheresse.

Les chronologies d'indice de croissance établies au seuil EPS de 0,85, permettant une analyse dendroclimatique fiable, couvrent de longues périodes, allant de 192 à 293 ans. Ces séries dendrochronologiques sont marquées par une oscillation importante, reflétant la forte variabilité climatique ayant marqué la région d'étude au cours des trois derniers siècles. Des différences importantes dans les valeurs extrêmes de l'indice de croissances ont été observées entre les quatre sites d'étude. Ceci met en évidence l'importance des conditions locales spécifiques à chaque site et peuplement.

Une analyse en composantes principales met en évidence le caractère interspécifique, avec un deuxième axe séparant nettement les quatre sites échantillonnés en deux groupes, où le cèdre de l'Atlas, un résineux, se détache des deux chênes caducifoliés des trois autres sites. Toutefois, l'axe 1 rassemble toutes ces espèces dans un seul tenant, exprimant les conditions climatiques plus ou moins similaires sur l'ensemble de la région d'étude. Ce résultat est renforcé par les résultats d'une matrice des corrélations qui montre des corrélations significatives entre toutes les chronologies établies.

L'utilisation de la méthode de l'intervalle interannuel moyen sous *pointResa* permis de détecter un nombre important d'années caractéristiques (PYs) : 84 PYs à TAK, dont 38 négatives, 83 PYs à ISEQC, avec 43 négatives, 77 PYs à ISEQA, dont 40 négatives et 82 PYs à AKF, dont 42 négatives.

Une analyse sur les PYs négatives communes au moins sur deux sites, correspondant à une chute substantielle de la croissance radiale due à une sécheresse, met en évidence plusieurs pics, dont ceux survenus au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle et entre la fin du XX^e et début du XXI^e siècles, qui ont coïncidé avec deux épisodes forestiers en Algérie. La tendance en PYs négatives sur les dernières décennies témoigne de la persistance de ce phénomène de nos jours, où des espèces des plus rustiques comme les chênes sont touchés. Néanmoins, si le paramètre climatique semble être le facteur déclenchant principal, des facteurs biotiques aggravants, telles que des attaques d'insectes ou de champignons,

auraient bien pu exacerber le processus de dépérissement et augmenté le taux de mortalité des arbres.

Des PYs aussi bien positives que négatives communes au moins sur trois sites, la moitié a été identifiée à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle. Ceci confirme la forte variabilité climatique ayant caractérisé la région d'étude au cours des dernières décennies, l'exposant de plus en plus aussi bien aux épisodes de sécheresses sévères qu'aux précipitations torrentielles, augmentant les risques associés à ces phénomènes, à l'image des incendies et des inondations.

Les PYs négatives ont été utilisées dans le calcul de quatre composantes d'indices de résilience sous *pointRes*, à savoir les indices de résistance, de récupération et de résilience, ainsi que la période de récupération.

Les résultats mettent en évidence des différences importantes entre les quatre sites d'étude, entre les trois espèces carottées et même, au cours du temps, au sein d'un même peuplement. Ceci montre une fois de plus l'importance du facteur génétique (interspécifique) et des conditions locales spécifiques caractérisant chaque site, telles que la topographie et les conditions édaphiques. Cela dit, le facteur le plus déterminant dans la variation des indices calculés reste les conditions climatiques avant, pendant et après une sécheresse. En effet, nos résultats montrent que des conditions défavorables à la croissance, exprimées par des PYs négatives, avant et après une sécheresse diminuent sensiblement la résistance, la récupération et la résilience des arbres, nécessitant des périodes de récupération sur plusieurs années. Au contraire, des années favorables à la croissance (années humides : PYs positives), voire même des années « normales » (non caractéristiques), renforcent la résilience des arbres face à la sécheresse et diminuent leur période de récupération d'une crise de croissance. A cela s'ajoute l'importance de l'intensité d'un événement de sécheresse (PY), ainsi que l'intensité des conditions aussi bien sèches que humides avant et après cet événement.

Par ailleurs, l'augmentation de la résilience au cours des dernières décennies observées dans tous les sites, malgré que cette période a été caractérisée par une augmentation de la fréquence en événements secs, pourrait être due au fait que des conditions récurrentes défavorables à la croissance pousseraient les arbres à se montrer plus résilients face à la sécheresse.

Enfin, afin de mieux appréhender les différences entre les résiliences des quatre peuplements étudiés, une analyse comparative a été effectuée sur les années caractéristiques identifiées au moins sur trois des quatre sites considérés. Les trois essences forestières se montrent plutôt peu résistantes à la sécheresse, mais affichent une bonne récupération (dans l'ensemble, l'indice de récupération est élevé et la période de récupération courte). Par contre,

la tendance affichée par l'indice de résilience met en évidence la prévalence relative de la persistance de la crise de croissance suite à un événement sec, mettant en exergue la vulnérabilité des espèces étudiées face à la sécheresse.

Si, dans l'ensemble, cette dernière analyse confirme que les conditions climatiques avant et après un événement sec constituent l'élément le plus déterminant dans la résilience des peuplements étudiés, dans les quelques situations où les conditions sont plus ou moins similaires, notre résineux du mont Takoucht, le cèdre de l'Atlas, se présente comme l'espèce la plus vulnérable à la sécheresse par rapport au chêne zéen et chêne afarès. La comparaison entre les feuillus caducifoliés, notamment entre les deux peuplements dont les aires d'échantillonnage se chevauchent au mont Issek, révèle que c'est plutôt le chêne zéen qui fait mieux face à la sécheresse que le chêne afarès.

Les résultats de cette étude apportent un premier éclairage sur la résilience de trois espèces forestières au niveau de la région de Béjaïa. Ils constituent des éléments cruciaux à intégrer dans les stratégies de gestion durable de nos écosystèmes forestiers dans le contexte des changements climatiques actuels, en prenant en considération la sensibilité de chaque espèce, ainsi que les conditions écologiques spécifiques à chaque site.

Dans une perspective d'approfondir cette étude, il serait pertinent d'élargir cette analyse à d'autres massifs forestiers tout en intégrant un plus grand nombre d'espèces. Un complément d'analyse climatique détaillée, du moins sur les derrières décennies où la donnée instrumentale est disponible, permettra d'évaluer l'intensité des événements secs et humides survenues avant, pendant et après les années caractéristiques négatives identifiées. Par ailleurs, la prise en compte d'autres paramètres abiotiques, tels que les facteurs édaphiques, ainsi que les facteurs biotiques, notamment les épisodes d'attaque d'insectes ou de champignons, offrirait une compréhension plus fine des mécanismes impliqués dans les crises de croissance des arbres.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdessemed K. 1981. Le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Étude phytosociologique. Problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Doc. Ing. Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille, 201p.
- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., *et al.* 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259 (4) : 660-684. Doi : 10.1016/j.foreco.2009.09.001
- Anchukaitis K., Touchan R., Meko D.M., Kherchouche D., Slimani S., Sivrikaya F., *et al.* 2024. Enhancing spatiotemporal reconstructions of hydroclimate variability across the Mediterranean during the last millennium. *Climate Dynamics* 62 (6) : 1-21. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07166-6>
- Bornot Y. 2017. Peut-on changer les trajectoires de croissance du chêne sessile et du sapin de Douglas suite à une sécheresse en modulant la fertilité du sol ? Thèse de doctorat. Université de Lorraine, France, 116p.
- Bose A.K., Scherrer D., Camarero J.J., Ziche D., Babst F., Bigler C. *et al.* 2021. Climate sensitivity and drought seasonality determine post-drought growth recovery of *Quercus petraea* and *Quercus robur* in Europe. *Sci. Total. Environ.* 784, 147222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147222>
- Bréda N., Badeau V. 2008. Forest tree responses to extreme drought and some biotic events: Towards a selection according to hazard tolerance? *C. R. Geoscience* 340(9) : 651-662. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.003>
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. 2004. La Sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française* 56(2) : 109-131. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03449335>
- Bunn A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26 : 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.
- Buras B., Ovenden T., Rammig A., Zang C.S. 2022. Refining the standardized growth change method for pointer year detection: Accounting for statistical bias and estimating the deflection period. *Dendrochronologia* 74, 125964.

- Byun J.G., Lee W.K., Kim M., Kwak D.A., Kwak H., Park T., Jung J.H. 2013. Radial growth response of *Pinus densiflora* and *Quercus* spp. to topographic and climatic factors in South Korea. *Journal of Plant Ecology* 6(5) : 380-392. Doi : 10.1093/jpe/rtt001.
- Carnicer J., Barbeta A., Sperlic D., Coll M., Peñuelas J. 2013. Contrasting trait syndromes in angiosperms and conifers are associated with different responses of tree growth to temperature on a large scale. *Frontiers in Plant Science* 4 : 409. doi: 10.3389/fpls.2013.00409.
- Cook E.R. 1985. A Time-Series Approach to Tree-Ring Standardization. Thèse de Doctorat. The University of Arizona, Tucson, 171p.
- Cook E.R., Holmes R.L. 1999. Program ARSTAN User's Manual. Tucson, AZ : Laboratory of Tree-Ring Research. The University of Arizona, Tucson, 81p.
- Cook E.R., Kairiukstis L.A.E. 1990. Methods of dendrochronology : Applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publishers, 408p.
- Cook E. R., Krusic P. J. 2005. ARSTAN v. 41d : A treering standardization program based on detrending and autoregressive time series modeling, with interactive graphics. Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, Palisades, New York, USA.
- Cropper J.P. 1979. Tree-ring skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin* 39 : 47-60.
- Delwaide A., Fillion L. 2010. Échantillonnage et datation dendrochronologique, *in* : S. Payette et L. Fillion. *La Dendrochronologie : Principe, méthode et applications*. Presses de l'Université Laval, Québec, Québec. pp. 167-197.
- Dobignard A., Chatelain C. 2010-2013. Index synonymique de la flore d'Afrique du Nord. 5 volumes. Conservatoire et Jardin Botaniques de la Ville de Genève, Suisse.
- Douglass A.E. 1939. Typical site of trees producing the best crossdating. *Tree-Ring Research* 6 (2) : 10-11.
- Douglass A.E. 1946. Precision of ring dating in tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research Bulletin* 17(3) :1-21.
- FAO. 2022. La Situation des forêts du monde 2022. Des solutions forestières pour une relance verte et des économies inclusives, résilientes et durables. Rome, 151p. <https://doi.org/10.4060/cb9360fr>
- FAO. 2024. La Situation des forêts du monde 2024 – Innovations dans le secteur forestier pour un avenir plus durable. Rome, 114p. <https://doi.org/10.4060/cd1211fr>
- Fritts H.C. 1976. *Tree rings and climate*. London, New York, San Francisco, Academic Press, 567p.

- Garah K., Bentouati A., Sánchez-Salguero R. 2016. Growth responses of *Pinus halepensis* Mill. plantations to climatic variables in Aurès mountains, Algeria. Scientific Technical Report STR 16/04. Trace 14: 134-142. <http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-16042>
- Gauquelin T. 2016. Le changement climatique : quelles conséquences sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes forestiers méditerranéens ? L'apport des stations expérimentales in natura. Forêt Méditerranéenne 37 (4) : 275-278.
- Gazol A., Camarero J.J., Vicente-Serrano S.M., Sanchez-Salguero R., Emilia G., De Luis M., *et al.* 2018. Forest resilience to drought varies across biomes. *Global Change Biology* : 1-16. Doi : <https://doi.org/10.1111/gcb.14082>
- Gélard J.P. 1978. Carte géologique du nord-est de la Grande Kabylie. Schéma structural, échelle 1/50 000. Travaux du laboratoire associé au C.N.R.S. N°157. Imprimerie Darantière, Dijon-Quetigny.
- Gharzouli R. 2007. Flore et végétation de la Kabylie des Babors : étude floristique et phytosociologique des groupements forestiers et post-forestiers des djebels Takoucht, Adrar Ou-Mellal, Tababort et Babor. Thèse de Doctorat, Université de Sétif, 253p.
- Holmes R.L. 1983. A computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43 : 69-78.
- IPCC. 2023. Summary for policymakers. In: *Climate change 2023 : Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Jetschke G., Van der Maaten E., Van der Maaten-Theunissen M. 2019. Towards the extremes: A critical analysis of pointer year detection methods. *Dendrochronologia* 53 : 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.004>.
- Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez E.M., Attalah S., Bouzghaia M. 2012. Impact of droughts on *Cedrus atlantica* forests dieback in the Aurès (Algeria). *J. Life Sci.* 6 : 1262-1269.
- Kherchouche D., Kalla M., Gutiérrez E.M., Briki A., Hamchi A. 2013. La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma(Algérie). *Sécheresse* 24 (2) : 129-37.
- Kherchouche D., Slimani S., Touchan R., Touati D., Malki H., Baisan CH. 2019. Fire human-climate interaction in Atlas cedar forests of Aurès, northern Algeria. *Dendrochronologia* 55 : 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.005>

- Kim M., Lee W.K., Son Y., Yoo S., Choi G.M., Chung D.J. 2017. Assessing the impacts of topographic and climatic factors on radial growth of major forest forming tree species of South Korea. *For. Ecol. Manag.* 404 : 269–279. [10.1016/j.foreco.2017.08.048](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.048)
- Ladier J. 2022. Forêts méditerranéennes face au changement climatique : les actions engagées en forêt publique. *Forêt Méditerranéenne* 37 (4) : 293-298.
- Lapie G. 1909. Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurdjura. Thèse de Doctorat. Université de Paris, 156 p.
- Laribi M. Les mares temporaires du nord-est de la Grande Kabylie : diversité phytocoenotique, floristique et conservation. Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 188p.
- Larsson L. 2005. CDendro & Coorecorder program package, version 9.8.1 23 mars 2022. <https://www.cybis.se/forfun/dendro>.
- Lebourgeois F., Mérian P. 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. AgroParisTech-ENGREF, 85p.
- Libert-Amico A., Duchelle A.E., Cobb A., Peccoud V., Djoudi H. 2022. Forest-based adaptation : transformational adaptation through forests and trees. Rome, FAO, 65p. <https://doi.org/10.4060/cc2886en>
- Lloret F., Keeling E.G., Sala A. 2011. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120 : 1909-1920. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>
- Meddour R. 1993. Analyse phytosociologique de la chênaie caducifoliée mixte de Tala Kitane (Akfadou, Algérie). *Ecologia Mediterranea* 19 (3/4): 43-51.
- ECOLOGIA MEDITERRANEA XIX (3/4) 1993 : 43-51 Analyse phytosociologique de la chênaie caducifoliée mixte de Tala Kitane (Akfadou, Algérie)
- Messaoudène M. 1989. Etude dendroécologique et productivité de *Q. canariensis* Willd et de *Q. afares* Pomel dans le massif de l'Akfadou et de Beni-Ghorbi en Algérie. Thèse de doctorat en sciences, université Aix-Marseille, 124p.
- Messaoudène M., Tessier L. 1997. Relations cerne-climat dans des peuplements de *Quercus afares* Willd. et *Quercus canariensis* Pomel. en Algérie. *Annales des Sciences forestières* 54 (4) : 347-358.
- Navarro-Cerrillo R.M., Sarmoum M., Gazol A., Abdoun F., Camarero J.J. 2019. The decline of Algerian *Cedrus atlantica* forests is driven by a climate shift towards drier conditions. *Dendrochronologia* 55: 60–70. doi: [10.1016/j.dendro.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.003)

- Neuwirth B., Schweingruber F., Winiger M. 2007. Spatial patterns of central European pointer years from 1901-1971. *Dendrochronologia* 24 : 79-89. doi:10.1016/j.dendro.2006.05.004
- Nicault, A., Begin, Y., Cuiot, J. 2019. Standardisation des séries dendrochronologique. Pages 199-227 in Payette, S. et Filion, L., *La dendrochronologie : principe, méthode et applications*. Presses de l'université Laval, Québec.
- Obert D. 1974. Phases tectoniques mésozoïques d'âge anté-cénomaniens dans les Babors (Tell nord-sétifien, Algérie). *Bull. Soc. Géol. Fr.* 16 : 171-175.
- Obert D. 1984. Importance de la paléotectonique dans l'orogénèse tellienne des Babors. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique* 25 (2) : 99-117.
- Ouigra L. 2022. Dendroclimatologie du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) du mont Issek (Béjaïa, Algérie). Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 33p.
- Ourdani K. 2017. La réponse de la cédraie de Takoucht (Béjaïa) à la variabilité climatique. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 50p.
- Piedallu C. 2024. Impact du changement climatique sur les forêts. Partie 2 : comment adapter nos forêts aux effets du changement climatique ? *Revue forestière française* 75(4) : 307-321. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2024.8423>
- Qin C., Yang B., Bräuning A., Sonechkin D.M., Huang K. 2011. Regional extreme climate events on the northeastern Tibetan Plateau since AD 1450 inferred from tree rings. *Glob. Planet. Change* 75 : 143-154. Doi : 10.1016/j.gloplacha.2010.10.013
- R Core Team. 2025. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Rabhi K. Ajustement de modèles hauteur-circonférence-âge pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou (Tizi Ouzou) ; effet de la densité et de la station. Mémoire de magister, Université Aboubekr Belkaïd-Tlemcen, 67p.
- Ruiz-Benito P., Ratcliffe S., Zavala M.A., Martínez-Vilalta J., Vila-Cabrera A., Lloret F. 2017. Climate- and successional-related changes in functional composition of European forests are strongly driven by tree mortality. *Glob. Change Biol.* 23 (10) : 4162-4176. <https://doi.org/10.1111/gcb.13728>
- Safar W., Serre-Bachet F., Tessier L. 1992. Les plus vieux pins d'Alep vivants connus. *Dendrochronologia* 10 : 41-52.
- Salamani M. 1991 Premières données palynologiques sur l'histoire Holocène du Massif de l'Akfadou (Grande-Kabylie, Algérie). *Ecologie mediterranea* 17(1) : 145-159.

- Sarmoum M., Camarero J., Abdoun F. 2024. Aridification increases growth resistance of Atlas cedar forests in NW Algeria. *Forest Ecology and Management* 556 : 121730. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121730>
- Sarmoum M., Navarro-Cerrillo R., Guibal F. 2019. Bilan actuel et rétrospectif du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques* 342 (4) : 29-40. Doi : 10.19182/bft2019.342.a31636
- Sbabdji M., Lambs L., Haddad A., Kadik B. 2015. Effect of periodic defoliations by *Thaumetopoea pityocampa* Schiff. on radial growth in cedar woodland in Chréa, Algeria. *Terre et Vie* 70 (4) : 371-386.
- Scharnweber T., Manthey M., Wilmking M. 2013. Differential radial growth patterns between beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on periodically waterlogged soils. *Tree Physiol.* 33 : 425-437. Doi : 10.1093/treephys/tpt020
- Schmitt A., Trouvé R., Perret S., Calas A., Seynave I., Lebourgeois F. Une sylviculture dynamique des chênaies sessiliflores favorise la résilience des arbres après une forte sécheresse. *Revue Forestière Française* 74(1) : 29-44. Doi : 10.20870/revforfr.2023.7411
- Schweingruber F.H., Eckstein D., Serre-Bachet F., Bräker O.U. 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8 : 9-38.
- Simon, P., Lena, M., 2016. Radial growth response of horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) trees to climate in Ljubljana, Slovenia. *Urban For. Urban Greening* 18 : 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.05.013>
- Slimani S. 2014. Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'historique des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord de l'Algérie. Thèse Doc. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 171p.
- Slimani S., Derridj A., Gutiérrez E. 2014a. Ecological response of *Cedrus atlantica* to climate variability in the Massif of Guetiane (Algeria). *Forest Systems* 23 (3) : 448-460. <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-05175>
- Slimani S., Kherchouche D., Ait Medjber R., 2021b. La cédraie algérienne à l'épreuve du changement climatique. *Forêt méditerranéenne* 42(2) : 101-106.
- Slimani S., Kherchouche D., Bekdouche F., Gutiérrez E. 2021a. Tree-ring reconstruction of March-June precipitation from the Atlas cedar forest of Mount Takoucht, Béjaïa (northern Algeria). *Forest Systems* 30(3), e011. <https://doi.org/10.5424/fs/2021303-18111>

- Slimani S., Touchan R., Derridj A., Kherchouche D., Gutiérrez E. 2014b. Fire history of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) in mount Chélia, northern Algeria. *Journal of Arid Environments* 104 : 116-123. Doi : 10.1016/j.jaridenv.2014.02.008
- Suominen M., Junninen K., Heikkala O., Kouki J. 2015. Combined effects of retention forestry and prescribed burning on polypore fungi. *Journal of Applied Ecology* 52 : 1001-1008. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12447>
- Stokes M.A., Smiley T.L. 1996. An introduction to tree-ring dating. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 73p.
- Tafer M., Slimani S., Kherchouche D., Bekdouche F., Messaoudène M. 2022. Événements climatiques extrêmes et croissance radiale de *Cedrus atlantica* (Manetti) dans les massifs du Belezma et du Chélia (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques* 350 : 43-56. <https://doi.org/10.19182/bft2021.350.a36298>
- Tessier L., Nola P., Serre- Bachet F. 1994. Deciduous *Quercus* in the Mediterranean region: tree-ring/climate relationships. *Neu. Phytol.* 126 : 355-36.
- Thurm E.A., Uhl E., Pretzsch H. 2016. Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *For. Ecol. Manage.* 376 : 205-220. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.020>.
- Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Attalah S., Baisan C., Aloui A. 2008. Long term context for recent drought in northwestern Africa. *Geophysical Research Letters* 35, L13705. doi:10.1029/2008GL034264.
- Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Kerchouche D., Slimani S., Ilmen R., *et al.* 2017. Climate controls on tree growth in the Western Mediterranean. *The Holocene* 1-14. <https://doi.org/10.1177/0959683617693901>
- Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Sabir M., Attalah S., Aloui A. 2010. Spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim. Dyn.* Doi: 10.1007/S0038260106080464.
- Touchan R., Kherchouche D., Oudjehih B., Touchan H., Slimani S., Meko D.M. 2016. Dendroclimatology and wheat production in Algeria. *Journal of Arid Environments* 124 : 102-110. Doi : 10.1016/j.jaridenv.2015.07.016
- Van der Maaten E., Stolz J., Thurm E.A., Schröder J., Henkel A., Leinemann L., Profft I., Voth W., Van der Maaten-Theunissen M. 2024. Long-term growth decline is not reflected in crown condition of European beech after a recent extreme drought. *Forest Ecology and Management* 551, 121516. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109103>.

- Van der Maaten-Theunissen M., Trouillier M., Schwarz J., Skiadaresis G., Thurm E., Van der Maaten E. 2021. PointRes 2.0 : New functions to describe tree resilience. *Dendrochronologia* 70, 125899. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125899>.
- Van der Maaten-Theunissen M., Van der Maaten E., Bouriaud O. 2015. pointRes: an R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia* 35 : 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.006>.
- Vié J. C., Hilton-Taylor C., Stuart, S. N. 2009. *Wildlife in a Changing World : An analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. Gland (Suisse). 157p. <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/RL-2009-001.pdf>
- Velmex Inc. 2016. Velmex Measurement System. Bloomfield, NY: Velmex Inc.
- Yamaguchi D.K., Brunstein F.C. 1991. Special sanding films and sandpapers for surfacing narrow-ring increment cores. *Tree-Ring Bulletin* 51 : 43-46.
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23 : 201-213.
- Zidane Y., Zalouk R. 2024. Réponse du cèdre de l'Atlas, du chêne zéen et du chêne afarès des Babors occidentaux (Béjaïa) à la variabilité climatique. Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 49p.

Annexes

Annexes

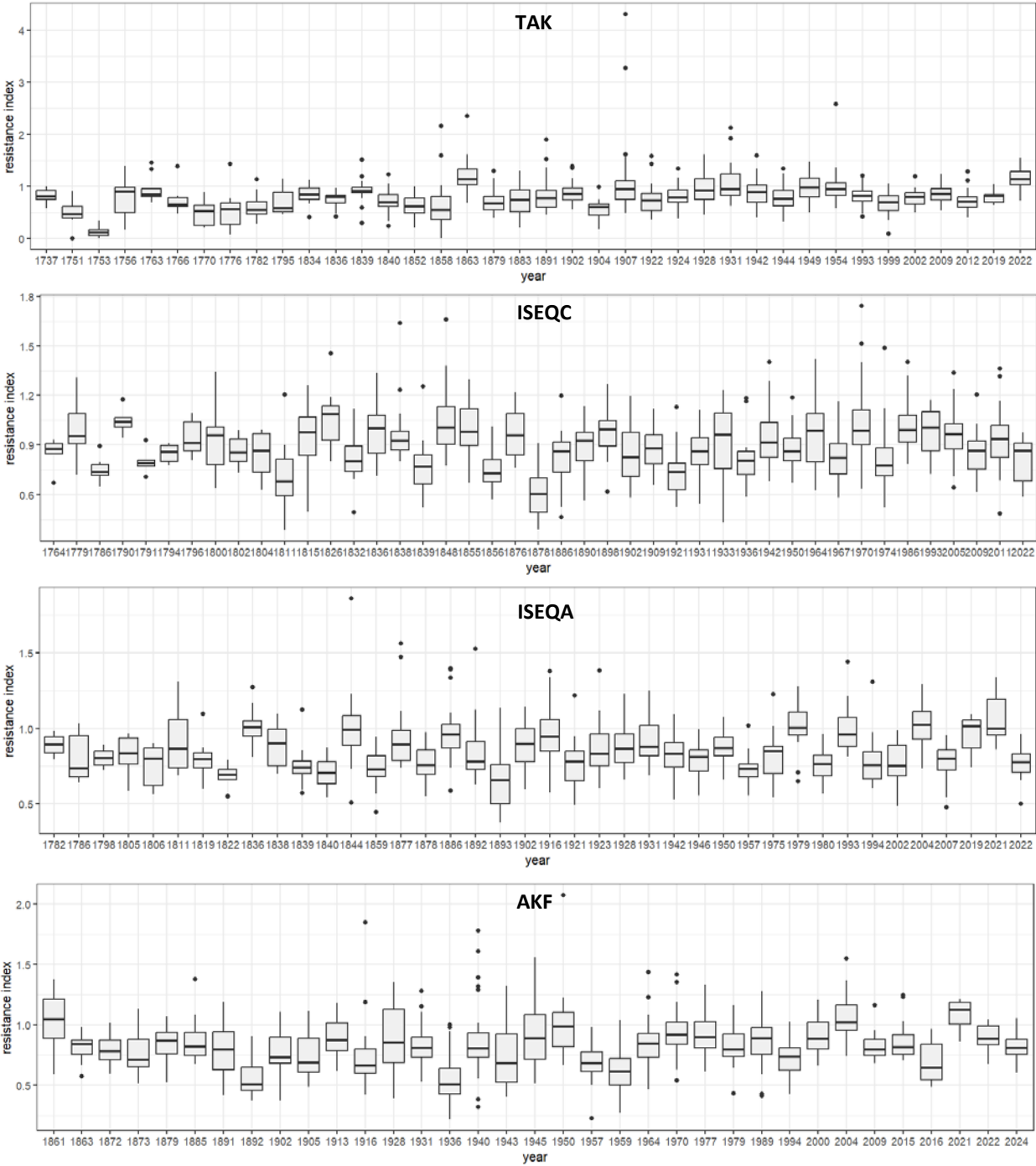
Annexe 1. Années caractéristiques positives communes au moins sur deux sites.

TAK	ISEQC	ISEQA	AKF
1771	1771		
1781	-	1781	
-	1784	1784	
1788	1788	-	
-	1789	1789	
1792	1792	-	
-	1795	1795	
1799	1799	1799	
-	1837	-	1837
1838	-	-	1838
-	1841	1841	1841
-	1847	1847	-
-	1860	1860	1860
1862	1862	-	1862
-	1864	1864	-
-	-	1883	1883
-	1891	1891	-
-	1900	1900	-
1923	-	-	1923
-	1929	1929	-
-	1941	1941	1941
1948	-	1948	1948
-	1953	1953	-
1960	-	1960	1960
1962	1962	-	-
1963	1963	1963	1963
-	-	1969	1969
1976	1976	1976	1976
1985	1985	1985	-
-	-	1992	1992
1998	-	-	1998
2003	2003	2003	2003
2010	2010	-	-
2018	2018	2018	-
2020	-	2020	2020

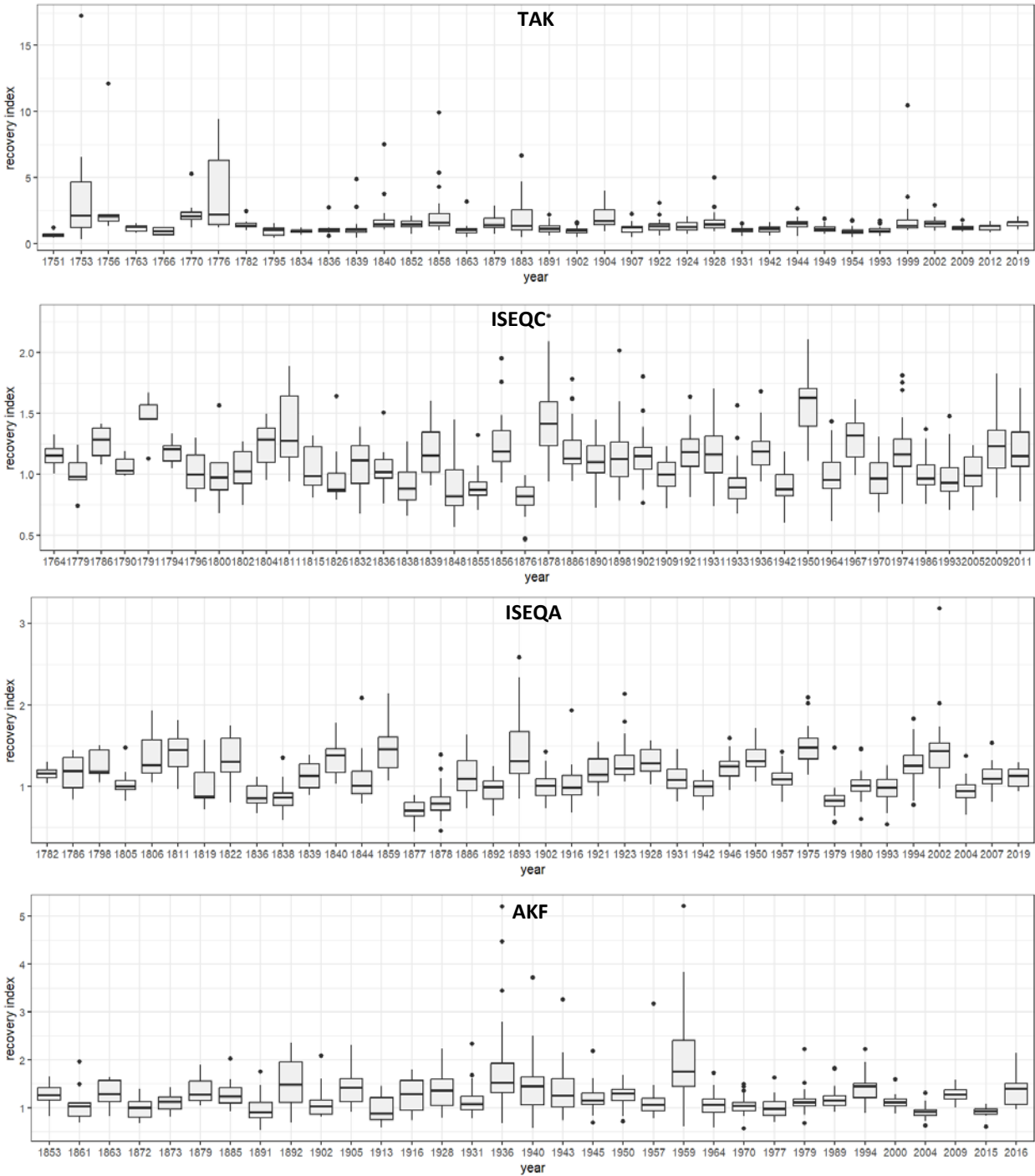
Annexe 2. Années caractéristiques négatives communes au moins sur deux sites.

TAK	ISEQC	ISEQA	AKF
1782	-	1782	
-	1786	1786	
1834	-	-	1834
1836	1836	1836	1836
-	1838	1838	-
1839	1839	1839	1839
1840	-	1840	-
-	1848	-	1848
-	1878	1878	-
1879	-	-	1879
-	1886	1886	-
1891	-	-	1891
-	-	1892	1892
1902	1902	1902	1902
-	-	1916	1916
-	1921	1921	-
1928	-	1928	1928
1931	1931	1931	1931
-	1936	-	1936
1942	1942	1942	-
-	1950	1950	1950
-	-	1957	1957
-	1964	-	1964
-	1970	-	1970
-	-	1979	1979
1993	1993	1993	-
-	-	1994	1994
2002	-	2002	-
-	-	2004	2004
2009	2009	-	2009
2019	-	2019	-
-	-	2021	2021
2022	2022	2022	2022

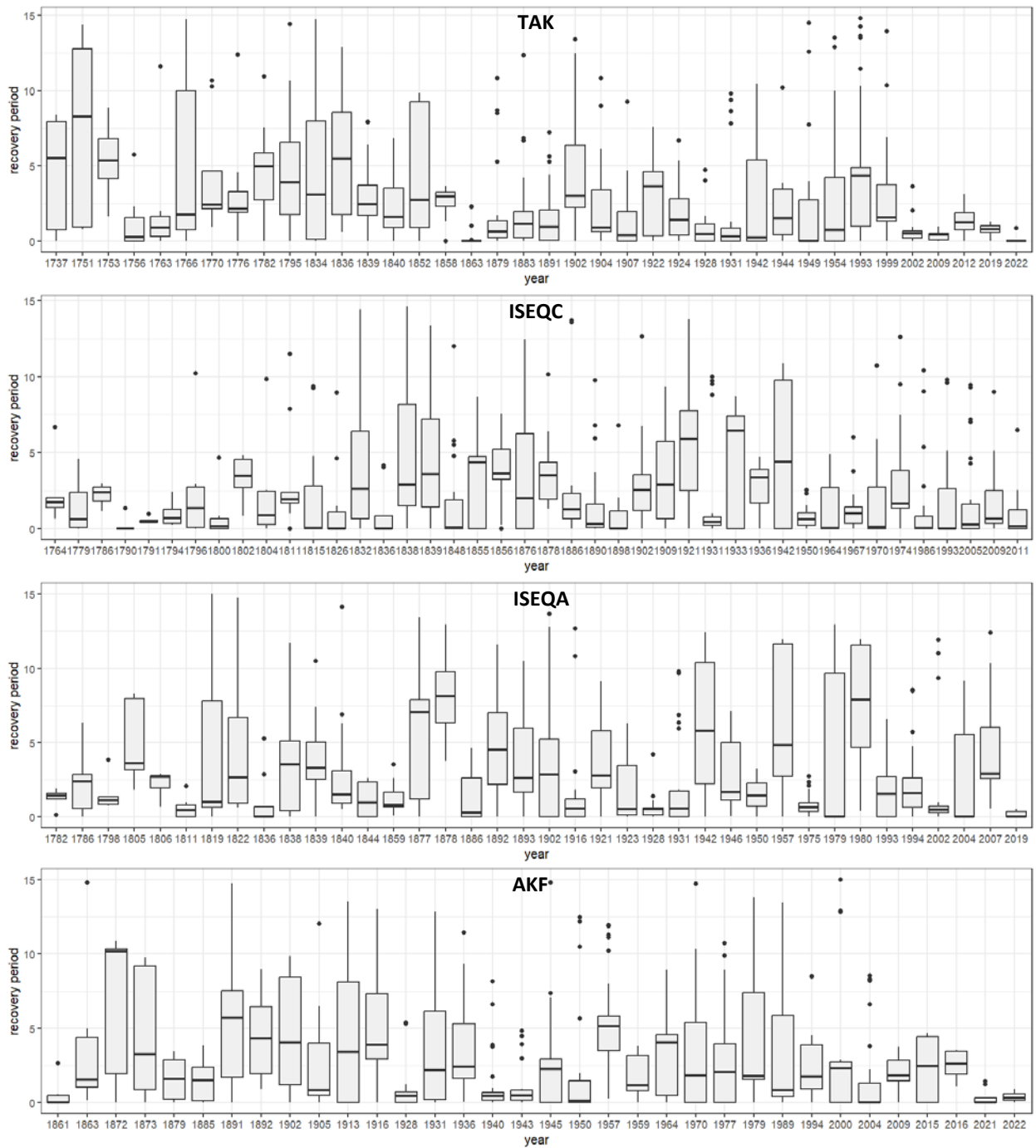
Annexe 3. Indices de résistance pour les quatre sites d'étude.



Annexe 4. Indices de récupération pour les quatre sites d'étude.



Annexe 5. Périodes de récupération pour les quatre sites d'étude.



Annexe 6. Indices de résilience pour les quatre sites d'étude.

