



**HAL**  
open science

# Quantification et modélisation de l'évolution du régime des feux au cours de l'Holocène et de l'Anthropocène en Corse

Marion Lestienne

► **To cite this version:**

Marion Lestienne. Quantification et modélisation de l'évolution du régime des feux au cours de l'Holocène et de l'Anthropocène en Corse. Climatologie. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. Français. NNT : 2019UBFCD052 . tel-02555105

**HAL Id: tel-02555105**

**<https://theses.hal.science/tel-02555105v1>**

Submitted on 27 Apr 2020

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

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

# THESE

*Pour l'obtention du grade de docteur en*

**BIOLOGIE DES POPULATIONS ET ECOLOGIE**

*École doctorale n°554 Environnement-Santé, Université Bourgogne Franche-Comté*

## QUANTIFICATION ET MODELISATION DE L'EVOLUTION DU REGIME DES FEUX AU COURS DE L'HOLOCENE ET DE L'ANTHROPOCENE EN CORSE

---

Présentée et soutenue publiquement le 15 novembre 2019 par

**MARION LESTIENNE**

Sous la direction de Boris VANNIÈRE et Christelle HÉLY

---

### COMPOSITION DU JURY

∴ <b>Thomas CURT</b> <i>Directeur de recherche IRSTEA, Aix-en-Provence</i>	<b>Président du Jury</b>
∴ <b>Laurent LESPEZ</b> <i>Professeur des Universités, Université de Paris-Est Créteil</i>	<b>Rapporteur</b>
∴ <b>Florent MOUILLOT</b> <i>Chargé de recherche HDR, IRD, Montpellier</i>	<b>Rapporteur</b>
∴ <b>Isabelle JOUFFROY-BAPICOT</b> <i>Ingénieure de recherche CNRS, Besançon</i>	<b>Examinatrice</b>
∴ <b>Marie-France LOUTRE</b> <i>Executive Director PAGES, Berne</i>	<b>Examinatrice</b>
∴ <b>Christelle HÉLY</b> <i>Directrice d'étude EPHE, Montpellier</i>	<b>Co-Directrice</b>
∴ <b>Boris VANNIÈRE</b> <i>Directeur de recherche CNRS, Besançon</i>	<b>Directeur</b>



# THESE

*Pour l'obtention du grade de docteur en*

**BIOLOGIE DES POPULATIONS ET ECOLOGIE**

*École doctorale n°554 Environnement-Santé, Université Bourgogne Franche-Comté*

## QUANTIFICATION ET MODELISATION DE L'EVOLUTION DU REGIME DES FEUX AU COURS DE L'HOLOCENE ET DE L'ANTHROPOCENE EN CORSE

---

Présentée et soutenue publiquement le 15 novembre 2019 par

**MARION LESTIENNE**

Sous la direction de Boris VANNIÈRE et Christelle HÉLY

---



### COMPOSITION DU JURY

<b>Thomas CURT</b> <i>Directeur de recherche IRSTEA, Aix-en-Provence</i>	<b>Président du Jury</b>
<b>Laurent LESPEZ</b> <i>Professeur des Universités, Université de Paris-Est Créteil</i>	<b>Rapporteur</b>
<b>Florent MOUILLOT</b> <i>Chargé de recherche HDR, IRD, Montpellier</i>	<b>Rapporteur</b>
<b>Isabelle JOUFFROY-BAPICOT</b> <i>Ingénieure de recherche CNRS, Besançon</i>	<b>Examinatrice</b>
<b>Marie-France LOUTRE</b> <i>Executive Director PAGES, Berne</i>	<b>Examinatrice</b>
<b>Christelle HÉLY</b> <i>Directrice d'étude EPHE, Montpellier</i>	<b>Co-Directrice</b>
<b>Boris VANNIÈRE</b> <i>Directeur de recherche CNRS, Besançon</i>	<b>Directeur</b>



---

---

## REMERCIEMENTS

---

---

Voici que se tourne une bien grande page ! Cette thèse n'existerait pas sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes qui ont participé, scientifiquement ou non, de près ou de loin, à son élaboration.

Tout d'abord, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, **Boris** et **Christelle** dont la présence, les conseils, la bienveillance m'ont permis de me dépasser pour aller au bout de cette aventure !

Un très grand merci à **Florent Mouillot** et **Laurent Lespez** pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse, ainsi qu'aux autres membres de mon Jury: **Marie-France Loutre**, **Isabelle Jouffroy-Bapicot**, et **Thomas Curt** pour avoir pris le temps d'évaluer ce travail.

Merci à **Daniele Colombaroli** qui m'a chaleureusement accueillie en Angleterre et m'a permis d'approfondir bien des aspects de ma thèse.

Merci à tous les membres du **Global Paleofire Working Group** pour m'avoir permis d'intégrer une équipe internationale de chercheurs passionnés.

Merci à toute l'équipe de Chrono-Environnement. Merci à **Isabelle**, pour son immense implication dans ma thèse et pour les séances de yoga partagées. Merci à mes supers Co-bureaux : **Céline**, **Amandine** et **Aurore** avec qui j'ai partagé bien plus qu'un bureau et que j'attends de pied ferme à Montpellier ! Merci à **Thomas** et à notre réorientation imaginaire dans l'évènementiel, à **Thibaut**, **Fanny**, **Emilie**, **Marine**, **Charles**, **Caroline** et les autres, avec qui j'ai partagé ma vie de doctorante. Merci à **Tsito** et **Antoine** pour leurs aides précieuses dans les préparations charbons et pollen ! Merci **Charles-Henri**, **Jean-Daniel**, **Damien**, **Sylvie**, **Dominique**, **Julien** et toutes les personnes que j'ai côtoyées, de près ou de loin à Chrono-Environnement.

Merci également à toute l'équipe de l'ISEM, ma terre d'accueil pour cette dernière année de thèse. Un merci particulier à **Jean-Fred** et **Sarah**, ainsi qu'à toute l'équipe

d'ORPAL 2014 qui m'ont initiée à la paléo et qui m'ont convertie ! Merci à **Laurent** (et à **PierrOI** qui l'a suppléé !), notre super « coach running » qui nous a fait souffrir et tenir un semi-marathon (et c'était pas gagné !). Merci à **Chéïma** et **Gwen**, avec qui j'ai partagé des défis improbables de mois sans sucre, sans alcool, de footing bien trop tôt ou bien trop long, et de marathons de 12h (de films cette fois !). Tout ça entrecoupé de cours de Bozendo. Merci à **Stéphanie** qui a réussi à supporter bien des membres de ma famille. Merci à **Mary**, **Marianne**, **Dorian**, et **Boris** pour les soirées jeux, les séances de yoga, les restos et pour avoir très significativement contribué à la bonne ambiance du bureau. Merci aux « ex-Isemiens », **Ben**, **Cécile**, **Carole**, qui sont partis rejoindre des contrées (plus ou moins) exotiques et qui nous donnent un aperçu de l'après-thèse.

Merci aux **bozendokas** bisontins et montpelliérains pour les bons moments partagés sur le tatami et en dehors. Merci à mes premiers élèves bisontins qui sont toujours là, avec une mention particulière à **François** pour son implication et son aide.

Merci à mes colloqs préférées, **Emilia** et **Sonia**, avec qui j'ai adoré boire des infus et danser sous l'orage.

Merci à mes ami-e-s qui sont toujours là et sans qui la vie serait moins jolie: **Léa**, **Camille**, **Laura**, **Kévin**, **Lauriane**, **Sarah**, **Pierre**, **Charline**... Merci à mes supers copains du Master Ecosystème pour tous les moments de joie partagés: **Solène**, **Antoine**, **Jérémy**, **Valentin**, **Thibault**, **Kévin**...

Merci à **ma famille**, qui a plus ou moins compris mon travail, mais qui a toujours été présente et d'un immense soutien. Merci à **Lydie**, **Michel**, **Florian**, **Dyssia** et **J.B.** pour m'avoir offert une fratrie. Merci à **mes parents** pour leur amour infini et pour l'inspiration qu'ils me donnent depuis plus de 27 ans.

Merci à **Mashka** pour ses ronrons réconfortants.

Merci à **Mathieu** de vivre cette aventure avec moi.

Et pour conclure, un très grand merci à **toutes les personnes qui lieront cette thèse** (jusqu'au bout évidemment !).

*« Pour prévoir l'avenir, il faut connaître le passé, car les événements de ce monde ont en tout temps des liens aux temps qui les ont précédés. »*

N. Machiavel



## AVANT-PROPOS

---

---

Cette thèse est construite autour de trois chapitres centraux, rédigés sous forme d'articles scientifiques, le premier étant sous presse<sup>1</sup>, le second en révision<sup>2</sup>, et le troisième<sup>3</sup> à soumettre. Ainsi, le **Chapitre I** fournira une introduction générale, le **Chapitre II** présentera les matériels et méthodes utilisés, chacun des **Chapitre III**, **Chapitre IV et Chapitre V**, rédigés donc sous la forme d'un article, présentera l'un des objectifs principaux de cette thèse, et le **Chapitre VI** discutera de la totalité des résultats obtenus, fournira une conclusion générale et présentera les perspectives à venir.

Ce choix de rédaction a l'avantage de présenter des travaux déjà reconnus ou en cours d'évaluation par des pairs de la communauté scientifique, cependant, cela a pour conséquence un rappel du contexte et de la méthodologie pour chaque les chapitres correspondant aux articles. C'est pourquoi la lecture de ce manuscrit fera apparaître quelques redondances inévitables dans le corps des différents articles. Cependant, afin de ne pas trop surcharger cette thèse de répétitions, les références utilisées dans ce manuscrit (références des articles incluses) sont rassemblées dans la section Bibliographie qui clôture ce document.

*Listes des articles :*

<sup>1</sup>**Chapitre III** : Marion Lestienne, Isabelle Jouffroy-Bapicot, Déborah Leyssenne, Pierre Sabatier, Maxime Debret, Pierre-Jean Albertini, Daniele Colombaroli, Julien Didier, Christelle Hély, and Boris Vannière (**sous presse**). *Fires and human activities as key factors of the high diversity of Corsican vegetation. The Holocene.*

<sup>2</sup>**Chapitre IV** : Marion Lestienne, Christelle Hély, Thomas Curt, Isabelle Jouffroy-Bapicot, Boris Vannière (**en révision**). *Combining the Monthly Drought Code and Paleoecological data to assess the Holocene climate impact on Mediterranean fire regimes. Fire*

<sup>3</sup>**Chapitre V** : Marion Lestienne, Boris Vannière, Thomas Curt, Isabelle Jouffroy-Bapicot, Christelle Hély (**à soumettre**). *Integrating past data in climate-driven Mediterranean fires danger assessment's for 2020-2100. Global and Planetary Change*

---

---

## RÉSUMÉ

---

---

Les régions au climat Méditerranéen abritent plus de 20% de la diversité végétale mondiale, et c'est dans le Bassin Méditerranéen qu'est née l'agriculture et que se sont succédées parmi les plus grandes civilisations. Les feux de forêts ont depuis toujours impacté et façonné ces écosystèmes en ouvrant le milieu et en modifiant la composition de la végétation. L'Homme a également joué un rôle déterminant dans l'histoire des paysages Méditerranéens, notamment *via* l'agriculture et le pastoralisme. Les changements globaux passés, actuels et futurs ont eu et auront des influences sur ces régions, et une bonne compréhension des relations entre les différentes composantes du système climat - feux – végétation – Homme est indispensable pour comprendre les phénomènes actuels et pour anticiper les changements futurs. Dans le Bassin Méditerranéen, la Corse fait partie des écosystèmes les mieux préservés en termes de richesse d'habitats et de végétations. C'est également la région française la plus touchée par les feux de forêts. De par son isolement géographique, sa diversité écosystémique et paysagère, sa longue histoire humaine et sa plus longue histoire encore avec le feu, la Corse est un site clef pour étudier la dynamique du système climat - feu - végétation – Homme en Méditerranée. En Corse comme dans le monde, ces dernières années ont été marquées par une croissance démographique, par la déprise pastorale et par le réchauffement climatique, augmentant ainsi le risque de feux par des ignitions plus nombreuses et par des propagations sur de plus grandes distances.

Dans ce contexte, l'objectif général de cette thèse vise à approfondir la compréhension des dynamiques de la végétation, des feux, du climat et de l'Homme en Corse et plus largement dans le Bassin Méditerranéen au cours de l'Holocène. De ce vaste objectif, découlent trois questions de recherches correspondant aux trois chapitres centraux : i) depuis quand l'importante biodiversité Corse s'est-elle mise en place, et quels sont ses facteurs de changement ? (Chapitre III) ; ii) Quelle a été la part du climat et des activités humaines sur les régimes de feux en Corse au cours de l'Holocène ? (Chapitre

IV) ; et iii) Quels changements sont à prévoir en termes de climat et de feux pour les décennies à venir (2020-2100) et avec quelles répercussions possibles ? (Chapitre V). Pour répondre à ces questions, des études paléoécologiques multi indicateurs ont été effectuées à partir des enregistrements sédimentaires des lacs d'altitude de Bastani et de Nino. Les charbons ont permis de reconstruire l'histoire des feux, le pollen l'histoire de la végétation et les spores de champignons l'histoire des activités humaines. A cela ajoutons de récents outils comme le MDC (indice de sécheresse mensuel), développé en région boréale pour des problématiques de feux actuels mais que nous avons testé sur des périodes passées puis appliqué sur le futur.

Ainsi, le Chapitre III montre que la végétation Corse a évolué tout au long de l'Holocène, mais que l'Homme et le feu, notamment en ouvrant le milieu, sont les principaux facteurs ayant permis le développement de l'exceptionnelle biodiversité actuelle Corse. Le feu est présent en Corse depuis au moins 12000 ans cal. BP, mais son origine a changé au cours du temps. Dans le Chapitre IV, le MDC a été utilisé pour reconstruire l'aléa de feux au cours de l'Holocène. Nos résultats montrent que le début de l'Holocène, caractérisé par un climat plus aride qu'aujourd'hui, a enregistré un régime de feux soutenu. Par la suite, en dépit d'un climat plus doux et d'une saisonnalité moins contrastée, qui ont dans un premier temps diminué la fréquence des feux, le régime de feux est redevenu soutenu à partir d'environ 6000 – 5000 ans cal. BP, et nous avons attribué cette recrudescence aux activités humaines toujours d'actualité aujourd'hui. Enfin, le Chapitre V tente de prédire l'évolution de l'aléa de feux futurs et montre que pour la première fois dans l'histoire humaine, nous sommes confrontés à une augmentation simultanée de la sécheresse et de l'impact humain, ce qui aura certainement pour conséquence d'augmenter considérablement la fréquence et l'intensité des feux.

Cette thèse contribue à offrir une meilleure compréhension de la dynamique des paysages Méditerranéens grâce à des études multi indicateurs précisément datées. Elle offre également des perspectives encourageantes quant à l'utilisation d'indices « actuels » (ici le MDC) pour des périodes plus anciennes ou à venir, permettant un nouvel éclairage sur les origines passées des feux et les conséquences à venir des changements climatiques en terme d'aléas incendies.

**Mots-Clefs :** Méditerranée, paléoécologie, pollen, charbons de bois, spores de champignons, pastoralisme, déforestation, biodiversité, saison de feux, fire weather index, indice de sécheresse, modèles climatiques

## ABSTRACT

---

---

The Mediterranean regions hosts more than 20% of the world's plant diversity, and it is in the Mediterranean Basin that the agriculture born and where some civilizations among the most important developed. Forest fires have always impacted and shaped the environment and the vegetation composition. Later, humans have also played a decisive role in the history of Mediterranean landscapes, particularly through agriculture. Past, present and future global changes also affect regions, and a good understanding of the relationships between climate, fire, vegetation, and humans is essential to understand current events and to anticipate future changes. In the Mediterranean Basin, Corsica is one of the best preserved ecosystems in terms of habitat and species richness. It is also the French region the most affected by forest fires. Due to its geographical isolation, its landscape diversity, its long history with humans and its longer history with fire, Corsica is a key site to study the dynamics between the climate, fire, vegetation, and humans in the Mediterranean region. In Corsica, as worldwide, in recent years have been marked by population growth, pastoral decline and global warming, increasing the risk of fire in terms of ignitions and propagation.

In this context, the aim of this thesis is to deepen the understanding of the dynamics of vegetation, fire, climate and humans in Corsica and more broadly in the Mediterranean basin during the Holocene. From this vast objective, three research questions corresponding to the three core chapters (III, IV, and V) of this thesis emerge: i) Since when has the important biodiversity of Corsica been in place, and what are its factors of change? ii) What have been the influences of climate and human activities on fire regimes in Corsica during the Holocene? And iii) What are the changes in terms of climate and fires expected for the coming decades (2020-2100) and their possible consequences? To answer these questions, multi-proxies palaeoecological studies have been carried out for the Bastani and Nino lakes. The charcoals allowed to reconstruct the history of fires, pollen grains the history of

vegetation and fungal spores the history of human activities. To this, we added new tools such as the MDC (monthly drought index), developed in the boreal region for current fire problems, that we first tested on Holocene data using proxy data for comparison, and then applied on future period.

Thus, Chapter III showed that Corsican vegetation evolved throughout the Holocene, but that Man and fire, especially by opening the environment, are the main factors that have allowed the development of the exceptional biodiversity of Corsica. Fire has been present in Corsica for at least 12000 years cal. BP, but its origin has changed over time. In Chapter IV, the MDC was used to reconstruct fire hazard during the Holocene. Our results showed that the beginning of the Holocene, characterized by a more arid climate than today, recorded a sustained fire regime over several millennia. Subsequently, despite a milder climate and less contrasting seasonality, which initially reduced the frequency of fires, the fire regime became sustained again from around 6000 - 5000 years ago. BP. We attribute this increase to human activities that are still relevant today. Finally, Chapter V attempted to predict the evolution of future fire hazard and showed that for the first time in human history, we are facing a simultaneous increase in drought and human impact, which will likely result in a significant increase in the frequency and intensity of fires.

This thesis contributes to a better understanding of the dynamics of Mediterranean landscapes thanks to high-precision multi-proxies studies. It also offered encouraging prospects for the use of "current" indexes (here the MDC) on past or future periods, allowing new insight into the past origins of fires and the future consequences of changes in terms of fire hazard.

**Keywords:** paleoecology, pollen, charcoals, fungal remains, pastoralism, deforestation, biodiversity, fire season, fire weather index, drought code, climatic models, monthly drought code

---



---

## LISTES DES ABREVIATIONS LES PLUS FREQUENTES

---



---

	<b>Signification anglaise</b>	<b>Signification française</b>
Cal. BP	Calibrated Before Present (1950)	Calibrée avant le présent (1950)
FWI	Fire Weather Index	Indice forêt météo
DC	Drought Code	Indice de sécheresse
MDC	Monthly Drought Code	Indice mensuel de sécheresse
IPCC / GIEC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
RCP	Representative Concentration Pathway	Scénario de trajectoire du forçage radiatif
CHAR	CHarcoal Accumulation Rate	Taux d'accumulation de charbons
L/W	Length Width Ratio	Ratio longueur sur largeur
A/P	Area Perimeter Ratio	Ratio aire sur périmètre

---

---



---

## TABLE DES MATIERES

---



---

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>I</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTES DES ABBREVIATIONS LES PLUS FREQUENTES.....</b>	<b>X</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTES DES FIGURES.....</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTES DES TABLEAUX.....</b>	<b>XIX</b>
<b>CHAPITRE I. INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
1. CONTEXTE GENERAL.....	2
1.1. <i>Caractéristiques de la Méditerranée.....</i>	<i>2</i>
1.2. <i>Système Climat – Feux – Végétation - Homme.....</i>	<i>4</i>
1.3. <i>La Corse comme site clef.....</i>	<i>6</i>
1.4. <i>Enjeux à venir.....</i>	<i>7</i>
2. HYPOTHESES ET QUESTIONS DE RECHERCHE.....	8
2.1. <i>Depuis quand l'importante biodiversité Corse s'est-elle mise en place, et quels sont ses facteurs de changement ?.....</i>	<i>8</i>
2.2. <i>Quelle a été la part du climat et des activités humaines sur les régimes de feux Corses au cours de l'Holocène ?.....</i>	<i>9</i>
2.3. <i>Quels changements sont à prévoir en termes de climat et de feux pour les décennies à venir (2020-2100) et quelles sont les répercussions possibles ?</i>	
10	
<b>CHAPITRE II. MATERIELS &amp; METHODES.....</b>	<b>13</b>
1. SITES D'ETUDES.....	14
2. ÉCHANTILLONNAGE ET RECONSTRUCTIONS PALEOECOLOGIQUES.....	16
2.1. <i>Échantillonnage et datation.....</i>	<i>16</i>



2.2.	<i>Reconstitution des feux via les charbons de bois</i> .....	17
2.3.	<i>Reconstitution de la végétation et de l'utilisation des terres via le pollen et les spores de champignons</i> .....	18
2.3.1.	Analyses principales .....	18
2.3.2.	Évolution de la biodiversité végétale à partir des pollens.....	19
3.	<b>BASES DE DONNEES ET MODELISATION DE L'ALEA INCENDIE ET DE LA SAISON DES FEUX</b> .....	21
3.1.	<i>Données actuelles de feux</i> .....	21
3.2.	<i>Données climatiques</i> .....	22
3.2.1.	Conditions actuelles .....	22
3.2.2.	Conditions passées .....	22
3.2.3.	Conditions futures .....	23
3.3.	<i>Modélisation de l'aléa incendie</i> .....	26
3.4.	<i>Calcul des saisons de feux</i> .....	28
<b>CHAPITRE III. LES FEUX ET LES ACTIVITES HUMAINES SONT LES FACTEURS CLEFS DE LA GRANDE DIVERSITE VEGETALE EN CORSE</b> .....		<b>31</b>
RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....		32
SHORT ABSTRACT .....		34
1.	INTRODUCTION .....	35
2.	MATERIALS AND METHODS .....	37
2.1.	<i>Study area</i> .....	37
2.2.	<i>Core extraction</i> .....	39
2.3.	<i>Charcoal analysis</i> .....	39
2.4.	<i>Pollen and fungal remains analysis</i> .....	42
2.5.	<i>Biodiversity analysis</i> .....	43
3.	RESULTS .....	44
3.1.	<i>Age-Depth Model</i> .....	44
3.2.	<i>Pollen, fungal remains and charcoal dynamics</i> .....	45
3.3.	<i>Vegetation and biodiversity dynamics</i> .....	51
4.	DISCUSSION .....	53
4.1.	<i>Dynamics of Corsican landscape during the Holocene</i> .....	53
4.2.	<i>Fuel and fire type changes: from pinewood crown fire to slash-and-burn practices</i> .....	56

4.3.	<i>Did fire and human activities control or affect biodiversity?</i> .....	58
5.	CONCLUSION.....	60
	ACKNOWLEDGEMENTS .....	61
	ANNEXES .....	62
<b>CHAPITRE IV. LA COMBINAISON DU MDC ET DES DONNEES</b>		
<b>PALEOECOLOGIQUES POUR COMPRENDRE L'IMPACT DU CLIMAT SUR LES</b>		
<b>REGIMES DE FEUX MEDITERRANEENS AU COURS DE L'HOLOCENE .....</b>		
	RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	72
	SHORT ABSTRACT.....	74
1.	INTRODUCTION.....	76
2.	MATERIALS AND METHODS .....	78
2.1.	<i>Study area and sampled lakes</i> .....	78
2.2.	<i>Current fire and climate datasets</i> .....	80
2.3.	<i>Charcoal, pollen and fungal remains analysis</i> .....	82
2.4.	<i>Climatic model</i> .....	83
2.5.	<i>Fire Weather Index System</i> .....	84
2.6.	<i>Fire season</i> .....	85
3.	RESULTS.....	86
3.1.	<i>DC and MDC efficiently detect fire days of the current period</i> .....	86
3.2.	<i>Change in MDC and Fire Season during the Holocene</i> .....	88
3.3.	<i>Holocene paleofire and environmental changes from lacustrine sediment reconstructions</i> .....	90
4.	DISCUSSION.....	91
4.1.	<i>The efficiency of the DC and MDC to target potential fire days and assess the fire-season length</i> .....	91
4.2.	<i>Holocene history: from climatic to anthropogenic fires</i> .....	92
4.3.	<i>Current climate is getting close to the early Holocene climate conditions</i> 94	
4.4.	<i>Limitation of the study</i> .....	95
5.	CONCLUSION.....	95
	ACKNOWLEDGEMENTS .....	96
	ANNEXES .....	97

**CHAPITRE V. INTEGRATION DES DONNEES PASSEES DANS L’EVALUATION DE L’ALEA INCENDIES EN MEDITERRANEE DUE AUX CLIMAT POUR 2020 - 2100 ..... 103**

RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATIONS ..... 104

SHORT ABSTRACT ..... 106

1. INTRODUCTION ..... 108

2. MATERIALS AND METHODS ..... 109

    2.1. *Study area* ..... 109

    2.2. *Climate datasets*..... 110

    2.3. *Climate fire hazard assessment*..... 112

    2.4. *Fire season*..... 113

3. RESULTS ..... 113

    3.1. *Future predictions*..... 113

    3.2. *Intra-season variability*..... 114

4. DISCUSSION ..... 116

    4.1. *Fire hazard changes for the next decades* ..... 116

    4.2. *Will the future fire hazard be similar to the past fire regimes?*..... 118

    4.3. *Advantages and limits of the method*..... 120

5. CONCLUSION..... 120

ACKNOWLEDGEMENTS ..... 121

ANNEXES ..... 122

**CHAPITRE VI. DISCUSSION GENERALE & CONCLUSION ..... 125**

1. DES FEUX CLIMATIQUES AUX FEUX ANTHROPIQUES ..... 127

    1.1. *Il y a des feux en Corse depuis au moins 11 500 ans*..... 127

    1.2. *Comment distinguer les feux climatiques des feux anthropiques ?*..... 130

2. L’HOMME ET LE FEU SONT LES PRINCIPAUX FACTEURS DE L’IMPORTANTE BIODIVERSITE VEGETALE EN CORSE ..... 133

    2.1. *Les feux en Méditerranée : un bon exemple illustrant l’hypothèse de la « perturbation-intermédiaire »*..... 134

    2.2. *L’agriculture et le pastoralisme augmentent la diversité végétale*..... 137

    2.3. *Doit-on chercher à maximiser la biodiversité ?* ..... 138

3. UN ENVIRONNEMENT DE PLUS EN PLUS PROPICE AUX FEUX DANS LES DECENNIES A VENIR ..... 139

3.1.	<i>Les feux futurs seront-ils similaires à ceux observés au début de l'Holocène ?</i> .....	140
3.2.	<i>Quelles conséquences possibles et quelles mesures adopter ?</i> .....	142
4.	DE NOUVEAUX OUTILS DISPONIBLES .....	143
4.1.	<i>Nouvelles approches pour caractériser la morphologie des charbons de bois</i> 143	
4.2.	<i>Le MDC, un indice simple et efficace pour obtenir des tendances climatiques générales de l'aléa incendie et pour discriminer les feux climatiques des feux anthropiques sur la bases d'enregistrements paléocéologiques</i> .....	145
5.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....	147
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>150</b>

---



---

## LISTES DES FIGURES

---



---

<b>Figure I.1</b> - Années d'apparition de l'agriculture au nord du bassin Méditerranéen (Berger et Guilaine, 2009; Lacan, 2011).....	4
<b>Figure I.2</b> - Schéma synthétique résumant les interactions réciproques au sein du système climat-feu-végétation-Homme. Le type de feu réfère aux feux de surface (se propageant au sol) ou de couronne (se propageant jusqu'à la cime des arbres). .....	6
<b>Figure II.1</b> – Localisation géographique des zones d'études : le lac Nino (42°25' N, 8°94' E) et le lac Bastani(42°30' N, 9°80' E). .....	15
<b>Figure II.2</b> - Exemple de mesures de biodiversité et d'interprétation. Dans ce cas illustré, les 2 échantillons (A et B) ont la même richesse spécifique (4 espèces) mais pas la même équitabilité. En effet, chaque espèce représente 25% du total dans l'échantillon A, tandis que l'espèce jaune représente plus de 75% du total dans l'échantillon B. Dans cet exemple, en conclusion, l'échantillon A présente une plus grande biodiversité que l'échantillon B. ....	20
<b>Figure II.3</b> - Evolution du surplus de forçage radiatif émis par la surface du globe (énergie en W/m <sup>2</sup> ) d'ici à 2250 en fonction des différents scénarios de l'IPCC et de leurs équivalences (couleurs) selon ceux de première génération (les SRES) ou de deuxième génération (RCP) actuellement utilisés (Meinshausen et al., 2011; van Vuuren et al., 2011).....	25
<b>Figure II.4</b> – Diagramme du Système FWI avec les variables en entrée (boîtes grises) et les différents indices calculés (boîtes blanches) d'après Van Wagner (1987).....	26
<b>Figure III.1</b> - Localization, surrounding vegetation (CNRS Ecolab and CORINE Land Cover 2006 revised (2012)) and topographic section ( <a href="https://www.geoportail.gouv.fr/">https://www.geoportail.gouv.fr/</a> ) of the lake Bastani region (Corsica, FR).....	38
<b>Figure III.2</b> - Age-Depth Model for Bastani Lake sequence. Details for each date are presented in .....	44
<b>Figure III.3</b> - Age scaled diagram of pollen percentages, fungal spores and charcoal influx with indication of the main zones of the evolution. Pollen are represented as relative curves (%). Fungal remains are represented as influx curves (#/cm <sup>2</sup> /yr).	

Charcoal Accumulation Rate are presented both by the particle number (black curve; #/cm <sup>2</sup> /yr), and the total particule area (red curve; μm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup> /yr). Crosses highlight fire episodes marked by significant peaks detected with Charanalysis statistical treatment (Higuera et al. 2009). the normalized Width / Length (W/L) ratio and the normalized Area / Perimeter (A/P) ratio of charcoal document change in particle shape. ....	49
<b>Figure III.4</b> - RDA biplot of selected species and two explanatory variables: charcoal influx and spores of the dung fungus <i>Sporormiella</i> influx are used as proxies for fire (which influences 10.5% of data variance) and presence of grazing mammals (which influences 26.5% of data variance). <i>Castanea</i> , <i>Alnus</i> , <i>Triticum</i> and <i>Poaceae</i> , compose the first group. <i>Erica</i> and <i>Pinus</i> compose the second group, and <i>Plantago</i> , <i>Junipeus</i> , <i>Quercus pubescens</i> -type and <i>Quercus ilex</i> -type compose the last group.....	51
<b>Figure III.5</b> - Comparison between palynological richness estimated on a constant sum of 693 pollen grains. Spearman's rank correlation between richness and evenness: rho =0.73 // p-value > 0.001.....	52
<b>Figure III.6</b> - Palynological richness in function of CHAR and <i>Sporormiella</i> influx. ....	53
<b>Figure IV.1</b> - Geographical context of Corsica (France) and lakes from which sedimentary charcoals have been extracted: Nino (the present study); Creno (Leys et al., 2013) and Bastani (Lestienne et al., 2019).....	79
<b>Figure IV.2</b> - Comparisons of DC distributions between days with or without fire reported (left panel, t-test, p>0.001), and among increasing fire size classes (in ha, corresponding to the quartiles) as compared to the no-fire class (right panel). For both panels, fires and related days were extracted from the Prométhée DC. Dotted line in each panel corresponds to the chosen threshold (405 units) in order to calculate the Fire-Season Length. It excludes 75% of the no-fire days and includes 78% of the fire days. ....	86
<b>Figure IV.3</b> - (a) Correlation between MDC and DCmean using monthly values from April to October over the 1979-2016 period (n=532 corresponding to 7 months each year during 38 years). The dotted red curve represents the perfect match between DCmean and MDC, while the black curve is the linear regression model found, and for which the normal distribution and homoscedasticity of residuals have been tested.; (b) DCmean and the MDC changes along the Fire Season (currently set from April to October.....	87

<b>Figure IV.4</b> - Changes in MDC, fire-season length, fire signal (from CHAR), vegetation (from pollen composition) and pastoral activities (from fungal remains) during the Holocene. MDC and Fire-Season Length have been computed at the island scale, while charcoals, pollen and fungal remains have been extracted from lake sediments. “MDC” encompasses June, July, August, September and October. Creno data, for comparison, have been extracted from Leys et al., 2013 (Leys et al., 2013). .....	89
<b>Figure V.1</b> - Geographical context of Corsica (France).....	110
<b>Figure V.2</b> - MDC and FSL changes during the Holocene and future decades. MDC computation was performed from May to October, and the Fire-Season length subsequently estimated based on the 300-unit MDC threshold (see section 2.3). References to fires and human activities at the figure’s bottom come from a previous study based on microcharcoal- fire and <i>Sporormiella</i> -pasture paleoreconstructions from the Bastani Lake in Corsica (Lestienne et al. 2019). Past insolation come from Berger and Loutre (1991).....	115
<b>Figure V.3</b> - MDC distribution for the next decades in terms of month and the IPCC CMIP5 RCP scenarios. Red curves represent the 1979-2016 distribution, the plain curve being the median and the dotted curves being the first and third quartiles values. .....	116
<b>Figure VI.1</b> - Schéma synthétique résumant les interactions réciproques au sein du système climat-feu-végétation-Homme. Le type de feu réfère aux feux de surface (se propageant au sol) ou de couronne (se propageant jusqu’à la cime des arbres). ....	127
<b>Figure VI.2</b> – Synthèse des principaux résultats obtenus en terme d’évolution de la végétation, de l’activité humaine, des feux, et du hasard de feux pour l’Holocène	130
<b>Figure VI.3</b> - Schéma de synthèse reprenant l'histoire du feu, de l'Homme et de la biodiversité en Corse au cours de l'Holocène. ....	134
<b>Figure VI.4</b> - Schéma simplifié de l'hypothèse générale de la perturbation intermédiaire .....	135
<b>Figure VI.5</b> - Hypothèse de la perturbation intermédiaire appliquée aux régimes de feux Holocène en Corse. ....	136

---



---

## LISTES DES TABLEAUX

---



---

<b>Tableau II-1</b> - Principales caractéristiques des lacs étudiés en Corse et détails des échantillonnages et datations effectués. A titre informatif, ces caractéristiques ont également été renseignées pour le lac Creno, étudié par B. Leys (Leys, 2012; Leys et al., 2013) et dont les données ont été utilisées dans le chapitre IV. ....	15
<b>Tableau II-2</b> - Résumé des modèles climatiques utilisés dans cette thèse pour les périodes passées et futures. ....	25
<b>Tableau III-1</b> - List of core sections used for the Master Core of Bastani lake sequence (BAS15-MC) and sub-sampling bins used for paleoecological discrete analyses. ....	39
<b>Tableau III-2</b> - Pb <sup>210</sup> , <sup>14</sup> C and pollen-inferred ages used for Age-Depth model of Bastani lake sequence. ....	45
<b>Tableau III-3</b> - Summary of the 8 mains periods of paleoecological changes occurring in the lake Bastani sequence. These ZONES have been highlighted on the base of Pollen Zones and Fungal remains Zones obtained with the CONISS cluster analysis and on the CHARnb and CHARar variations ( <b>Figure III.3</b> ). For detailed pollen and fungal remains diagram, see the supplementary material. ....	50
<b>Tableau IV-1</b> - Main characteristics of current fire regime and Corsican climate normal. Fires (>5 ha) have been extracted from the Prométhée database ( <a href="http://www.promethee.com/">http://www.promethee.com/</a> ) and climate data have been extracted from ERA-Interim Climate Models ( <a href="https://www.ecmwf.int/">https://www.ecmwf.int/</a> ).....	81
<b>Tableau IV-2</b> - List and abbreviations of the Fire Weather Indices (Wagner et al., 1987) used in text. ....	85
<b>Tableau IV-3</b> - Details of MDC and Fire Season throughout the Holocene (last 11 millennia Before Present).....	90
<b>Tableau V-1</b> - Summary of the global climate models used in this study (based on the IPCC Fifth Assessment Report AR5) .....	112





---

---

## **Chapitre I.**

### **INTRODUCTION GENERALE**

---

---



## 1. CONTEXTE GENERAL

La mer Méditerranée représente seulement 0.7% de la surface totale des océans et 0.3% de leurs volumes, mais c'est sur les terres qui la bordent qu'est née l'agriculture (Brown et al., 2009) et que se sont succédées parmi les plus grandes civilisations (Robinson et al., 2006). A cela, ajoutons que les régions au climat Méditerranéen représentent à peine 5 % des terres sur le globe, mais elles abritent plus de 20 % de la diversité végétale mondiale (Cowling et al., 1996; Quezel, 1999). Les feux de forêts ont depuis toujours impacté et façonné ces écosystèmes en ouvrant le milieu et en modifiant la composition de la végétation. Plus tard, l'Homme a également joué un rôle déterminant dans l'histoire des paysages Méditerranéens, notamment *via* l'agriculture. Aujourd'hui encore, plusieurs facteurs permettent de distinguer les paysages Méditerranéens des autres, et ces différences sont principalement dues au climat, au rôle du feu, et à l'impact humain (Pausas et Vallejo, 1999).

### 1.1. CARACTERISTIQUES DE LA MEDITERRANEE

Sur le plan climatique, la mer Méditerranée influence le climat et la météo de manière très locale (ex : pluies cévenoles), mais aussi de manière plus régionale (Somot, 2005). Ainsi, la mer Méditerranée a fini par donner son nom à un climat, que l'on retrouve également bien loin de la *Mare Nostrum* des Romains : dans le sud-ouest de l'Australie, dans la province du Cap en Afrique du Sud, en Californie, ou au Chili central. Toutes ces régions ont en commun leur position : entre 30° et 45° de latitude, en façade ouest des continents et à proximité d'eaux marines fraîches. Mais si le mot climat (du grec κλίμα « klima ») apparaît déjà dans l'antiquité grecque (Bailly, 1930), il ne signifie rien d'autre qu'une bande de latitude recevant la même quantité d'énergie solaire, et il aura fallu attendre le début du XX<sup>ème</sup> siècle pour avoir les premières classifications climatiques. Ainsi, pour Köppen (1923) et pour Emberger (1963), le climat Méditerranéen est principalement caractérisé par une sécheresse estivale, bien qu'ils distinguent plusieurs sous-variétés en fonction du quotient pluviométrique. L'indice d'aridité de Gaussen (Gaussen et Bagnouls, 1952) définit un mois sec comme un mois pour lequel la valeur des précipitations mensuelles totales (en mm) n'excède pas le double de la valeur moyenne mensuelle des températures (en °C). Le climat est

ainsi dit « Méditerranéen » ou « xérothérique » si la température moyenne mensuelle est toujours positive et s'il y a entre 1 et 8 mois estivaux secs. Aujourd'hui, le climat Méditerranéen est usuellement caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs (ex: Magny et al., 2007; Pausas, 2004), ce qui le rend particulièrement favorable aux feux de forêts (Keeley, 2009; Mouillot et al., 2002, 2003).

Les archives montrent que les feux de forêts ont été naturels dans de nombreux écosystèmes du bassin Méditerranéen (Pausas et Vallejo, 1999) et font partie intégrante de leur fonctionnement (Bowman et al., 2009). Le concept de « régime de feux » décrit les caractéristiques moyennes des feux qui surviennent au sein d'un écosystème donné, impliquant des paramètres tels que l'occurrence, la fréquence ou l'intensité sur une échelle temporelle définie (Falk et Swetnam, 2003). Un incendie consomme et donc détruit de la biomasse, modifiant ainsi temporairement et au moins partiellement la structure et le fonctionnement de l'écosystème touché. En effet, après la mortalité (au moins partielle) inévitable qui suit le passage d'un feu, vient la régénération dans un sol enrichi en charbons et en cendres qui viendront stimuler la croissance des plantes (DeLuca et al., 2006; Kutiel et Naveh, 1987a, 1987b). De plus, l'ouverture du milieu permet le développement et l'expansion de nouvelles espèces, maintenant ou augmentant ainsi la biodiversité végétale (Bowman et al., 2009; Connell, 1978; He et al., 2019).

A l'échelle des écosystèmes, les régions au climat Méditerranéen sont moins diversifiées que les forêts tropicales mais bien plus que la plupart des autres régions tempérées (Cowling et al., 1996). Parmi ces régions méditerranéennes, le bassin Méditerranéen a été reconnu comme l'un des 25 plus importants « Hotspots » mondiaux de biodiversité (Myers et al., 2000; Norman, 2003), la plus forte biodiversité se trouvant dans les écosystèmes ouverts composés principalement d'arbustes et subissant des feux fréquents, ainsi que dans les zones pâturées (Colombaroli et Tinner, 2013; He et al., 2019; Lestienne et al., 2019b).

Parmi les causes probables de cette biodiversité, nous trouvons le feu, mais également l'Homme. Sa relation avec la Méditerranée est ancienne car elle a commencé au Proche-Orient il y a environ 12 000 / 11 000 ans cal. BP (Années calibrées avant le présent, le présent se situant à l'année 1950) avec la domestication de certaines plantes, puis la domestication des animaux (Zeder, 2008). Toutefois, ce n'est que bien plus

tard, entre 8500 et 6500 ans cal. BP selon les pays (**Figure I.1**), que l'agriculture se répandra sur tout le bassin Méditerranéen (Berger et Guilaine, 2009; Lacan, 2011).



*Figure I.1 - Années d'apparition de l'agriculture au nord du bassin Méditerranéen (Berger et Guilaine, 2009; Lacan, 2011).*

A partir de là, l'Homme va agir sur son environnement *via* l'agriculture et l'élevage (Janny et Costa, 2004) et il exercera un contrôle sur les régimes de feux de manière indirecte en modifiant la composition de la végétation (culture, élevage, déforestation...), ou de manière directe (ex : culture sur brûlis) (Connor et al., 2019; Ghilardi et al., 2017; Vannière et al., 2008, 2011, 2016). Aujourd'hui la grande majorité des feux en France est due à l'Homme, principalement allumés par accident ou par négligence, et beaucoup plus rarement intentionnellement (Curt et al., 2016; Fréjaville et Curt, 2015).

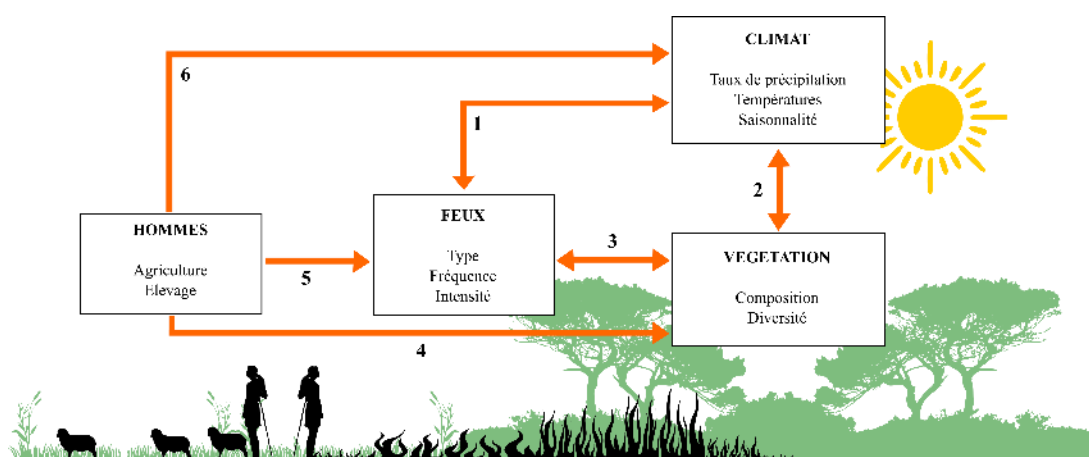
## 1.2. SYSTEME CLIMAT – FEUX – VEGETATION - HOMME

Au cours de l'Holocène, l'Homme s'est imposé comme un acteur majeur ayant un impact sur le système climat-feux-végétation déjà en place en Méditerranée, et plus généralement dans le monde (Colombaroli et al., 2007, 2008; Moriondo et al., 2006; Vannière et al., 2008, 2016).

Au sein de ce système, le climat et les conditions météorologiques vont influencer les régimes de feux en terme de fréquence et d'intensité de feu (**Figure I.2**, flèche 1) tandis que les feux vont à leur tour influencer le climat *via* les émissions de gaz à effets de serre, notamment le CO et le CO<sub>2</sub> mais aussi, de manière moins importante, des hydrocarbures tels que le CH<sub>4</sub> et des particules fines (Radke et al., 1991). Les feux influencent également le climat localement de manière plus indirecte *via* la réduction temporaire de la biomasse végétale capable de stocker certains gaz polluants et/ou à effet de serre comme CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, ou O<sub>3</sub> (Alessio et al., 2004; Lenihan et al., 2003; Mouillot et Field, 2005; Rashid, 1987). En Méditerranée, comme à l'échelle mondiale, le climat influence également la végétation (**Figure I.2**, flèche 2) *via* la productivité et les conditions de régénération des espèces (Bastianelli, 2018; Boisvenue et Running, 2006; Churkina et Running, 1998). Réciproquement, la végétation joue un rôle dans la régulation du climat, en régulant le flux de carbone et d'eau et en modifiant l'albédo (Bonan, 2008; Costanza et al., 1997).

*Via* sa composition, sa densité, son arrangement spatial et son humidité, la végétation va également influencer directement le type de feu et ses caractéristiques (**Figure I.2**, flèche 3) (ex. Beffa et al., 2016; Curt et al., 2007; Leys et al., 2018). A l'inverse, le feu participe à la régénération des écosystèmes et à la dynamique des successions végétales (Archibald et al., 2018).

En Méditerranée, l'Homme influence les régimes de feux et la végétation depuis le Néolithique (**Figure I.2**, flèche 4 et 5), *via* la déforestation ou encore la culture sur brûlis (Connor et al., 2019; D. Syphard et al., 2007; Lestienne et al., 2019b; Vannière et al., 2008). L'Homme influence aussi le climat (**Figure I.2**, flèche 6) *via* l'émission massive et significative des gaz à effets de serre émis par ses activités à minima depuis presque 300 ans (Field et Raupach, 2004; Graham et al., 1990; Pachauri et Reisinger, 2007), notamment dus aux feux qu'il allume, à l'élevage, mais aussi plus récemment aux transports (Fang et al., 2018; Pachauri et Reisinger, 2007; Rosa et Dietz, 2012).



**Figure I.2** - Schéma synthétique résumant les interactions réciproques au sein du système climat-feu-végétation-Homme. Le type de feu réfère aux feux de surface (se propageant au sol) ou de couronne (se propageant jusqu'à la cime des arbres).

### 1.3. LA CORSE COMME SITE CLEF

Au sein du bassin Méditerranéen, parmi les îles Tyrrhéniennes, la Corse est bien connue pour sa biodiversité végétale importante qui en fait un des écosystèmes Méditerranéens les mieux préservés (Médail, 2017; Médail et Verlaque, 1997; Mouillot et al., 2008). Cette diversité s'explique par son fort taux d'endémisme et par la grande variété d'habitats disponibles (Médail, 2017; Nogué et al., 2017; Pozzi et al., 2018; Saïd, 2002). Ainsi, la gamme altitudinale étendue de l'île entraîne plusieurs types d'écosystèmes (Gamisans, 1999). Les sites les plus arides caractérisent l'étage thermo-Méditerranéen (0 à 150 m pour les versants Sud, absents des versants Nord) tandis que les sites correspondent aux étages méso et supra-Méditerranéens (150 m à 1300 m pour les versants Sud, et 0 à 1000 m pour les versants Nord) sont composés principalement de chênaies sclérophylles dominées par le chêne vert (*Quercus ilex*, L. 1753). A des élévations moyennes (jusqu'à 1800 et 1600 m pour les versants Sud et Nord, respectivement), les pinèdes sont dominantes (*Pinus pinaster*, Aiton, 1789), suivies par les forêts mixtes composées notamment de chênes blancs (*Quercus pubescens*, Willd, 1796), ou de châtaigniers (*Castanea sativa*, Mill., 1768). Les étages les plus hauts (jusqu'à de 2200 et 2100 m pour les versants Sud et Nord respectivement, incluant nos sites d'études) sont dominés par le pin laricio (*Pinus laricio*, (J.W.Loudon) Hyl., 1913) sur les versants sud et par le sapin commun (*Abies*

*alba*, Mill., 1759) et le hêtre commun (*Fagus sylvatica*, L., 1753) sur les versants nord. Les sommets sont caractérisés par une végétation arbustive peu dense composée de genévrier (*Juniperus* sp., L., 1753), ou encore d'aulne vert (*Alnus suaveolens*, (Chaix) DC., 1805) (Gamisans, 1999; Gauthier et al., 1983; Mouillot et al., 2008). Cette richesse spécifique, incluant de nombreuses espèces endémiques, et les nombreux paysages qui la façonnent font de la Corse un lieu important tant sur le plan écologique (Médail et Verlaque, 1997; Mouillot et al., 2008; Pozzi et al., 2018; Saïd, 2002), qu'économique, notamment grâce au tourisme (Magnan et al., 2013; Moretti, 2007; Richez, 1996).

Mais la Corse est également la région de France la plus touchée par les feux de forêts, notamment dû à la présence de terrain accidentés et aux moyens de luttés moins nombreux que sur le continent (Curt et al., 2014; Lahaye et al., 2018a). Ces feux de forêts sont présents sur l'île au moins depuis le début de l'Holocène (Carcaillet et al., 1997; Leys et al., 2013), même si l'origine des allumages a certainement changé au cours du temps du fait de l'anthropisation des terres, notamment depuis le Néolithique (Ghilardi et al., 2017).

De par son isolement géographique, sa diversité écosystémique et paysagère, sa longue histoire avec l'Homme, et sa plus longue histoire encore avec le feu (plus de 12000 ans, Leys, 2012), la Corse est un site clef pour étudier en Méditerranée la dynamique du système feu-climat-végétation-Homme.

#### 1.4. ENJEUX A VENIR

Ces dernières années ont vu augmenter la démographie en Corse (Morelli and Francalacci, 2000a) comme partout en Europe, ce qui contribue à augmenter les occurrences de feux du fait d'allumages divers et variés (Curt et al., 2016; Lahaye et al., 2018a). A cela s'ajoutent le réchauffement climatique général, caractéristique de notre époque (Fang et al., 2011), ainsi que la déprise pastorale associée à une désertification des campagnes qui engendre une fermeture des milieux et donc une accumulation de combustible (Mouillot et al., 2005; San Roman Sanz et al., 2013a).

Dans le futur, les impacts de ces changements sur les écosystèmes seront complexes, avec des effets directs sur la végétation, son humidité et donc son inflammabilité et sa



combustibilité (Colombaroli et al., 2007; Curt et al., 2007). Ceci entraînera une modification des caractéristiques du régime de feux qui, à son tour, influencera la biomasse, la composition, et la diversité végétale (Giannakopoulos et al., 2005, 2009; Moriondo et al., 2006; Mouillot et al., 2002, 2003).

Ainsi, les liens entre le feu et la végétation, au vu du changement global (usages des sols et climat), sont amenés à changer. Connaître les dynamiques des populations forestières face à ces changements globaux est un enjeu actuel, tant pour la protection des territoires à fort risque d'ignition et de propagation des feux proches des habitations que pour préserver un territoire à fortes valeurs touristiques et écologiques (biodiversité et services écosystémiques).

## **2. HYPOTHESES ET QUESTIONS DE RECHERCHE**

Dans ce contexte, comment ont interagi, interagissent et interagiront la végétation, le climat, les activités humaines et les régimes de feux en Corse et plus généralement dans le Bassin Méditerranéen ? De cette vaste interrogation découlent trois questions et hypothèses de recherches associées plus spécifiques, constituant les trois axes principaux de cette thèse.

### **2.1. DEPUIS QUAND L'IMPORTANT BIODIVERSITE CORSE S'EST-ELLE MISE EN PLACE, ET QUELS SONT SES FACTEURS DE CHANGEMENT ?**

Comme nous l'avons exposé précédemment, la Corse est un hot spot régional de biodiversité à l'échelle mondiale, ce qui nous amène à nous poser la question de son ou ses origine(s). Le feu ayant toujours été présent en Méditerranée depuis l'émergence du climat Méditerranéen (Médail, 2017), nous pouvons raisonnablement émettre l'hypothèse que le feu pourrait être un des facteurs favorisant le maintien de la grande biodiversité caractéristique de la Corse. Mais d'autres facteurs ont pu influencer la biodiversité, dont l'Homme qui, de par ses activités, s'est imposé dès le

Néolithique. Pour tenter de répondre à cette question, nous allons donc devoir reconstruire l'histoire des feux, mais aussi celle de la végétation, du climat et des activités anthropiques. La paléoécologie est une science particulièrement adaptée à ces questions car elle permet de reconstruire les assemblages passés des plantes productrices de pollen, la dynamique passée des feux et la présence humaine passée afin d'étudier leurs relations sur le long-terme (Colombaroli et al., 2007, 2008; Lestienne et al., 2017; Vannièrre et al., 2008). Pour atteindre cet objectif et répondre à la question, nous nous sommes focalisés sur la diversité végétale, les activités humaines, les régimes de feux et leurs interactions sur les 12000 dernières années en Corse. Pour cela, nous avons étudié des sédiments lacustres du lac Bastani, un lac d'altitude clef en Corse car 1) sa haute altitude, son petit bassin versants et les forts vents ascendants environnant en font un bon capteur régional (Conchon, 1988; Roche et Loye-Pilot, 1989) et 2) son taux de sédimentation varie peu et sa chronologie couvre tout l'Holocène. Nous nous sommes basés sur une étude multi-indicateurs qui inclut les charbons, le pollen et les spores de champignons afin de reconstruire la biomasse brûlée, la dynamique du couvert végétal et l'histoire de l'utilisation des terres en Corse.

## 2.2. QUELLE A ETE LA PART DU CLIMAT ET DES ACTIVITES HUMAINES SUR LES REGIMES DE FEUX CORSES AU COURS DE L'HOLOCENE ?

Nous avons vu que le feu et les activités humaines sont deux perturbations majeures des écosystèmes Corses depuis des millénaires. Mais le point de bascule entre feux climatiques et feux anthropiques a été jusque maintenant difficile à cerner (Colombaroli et al., 2009; Reille et al., 1999; Vannièrre et al., 2008). Ainsi, nous testerons l'efficacité de l'indice mensuel de sécheresse ou « Monthly Drought Code » (« MDC », Girardin et Wotton, 2009), développé au départ pour les forêts boréales, et appliqué pour la première fois sur la région Méditerranéenne dans le cadre de cette thèse. Le calcul du MDC est dérivé de celui de l'indice de sécheresse « Drought Code » (DC), lui-même faisant partie du système d'indices forêt-météo « Fire Weather Index system » (« FWI », Wagner, 1987) qui a déjà fait ses preuves pour prédire les dangers de feux en Méditerranée (Aguado et al., 2003; Carvalho et al.,

2008; Moriondo et al., 2006). De plus, le DC et le MDC étant très bien corrélés dans les régions Nord Américaines (Bürger, 2013), nous émettons l'hypothèse que le MDC pourrait être un indicateur pertinent pour prédire les aléas de feux en région Corse sous contrainte climatique.

Grâce à son calcul, nous avons pour objectif de i) reconstruire l'aléa de feux sans la contrainte de devoir fournir des données météorologiques quotidiennes mais en ayant uniquement besoin de données mensuelles, ii) reconstruire l'aléa de feux pour tout l'Holocène à partir de conditions extraites des rares simulations paléoclimatiques mises à disposition par la communauté scientifique des modélisateurs du climat et iii) comparer l'aléa obtenu et ses changements avec les reconstructions paléoécologiques issues des bioindicateurs pour discuter les rôles du climat et de l'Homme sur les régimes de feux. L'intérêt du MDC réside en effet dans l'utilisation de données mensuelles plutôt que quotidiennes, ces dernières étant plus difficiles à obtenir et certainement moins réalistes que les moyennes mensuelles pour les périodes passées et de fait, futures (Hodges, 1996; Joussaume et Taylor, 1995; Pachauri et Reisinger, 2007).

### 2.3. QUELS CHANGEMENTS SONT A PREVOIR EN TERMES DE CLIMAT ET DE FEUX POUR LES DECENNIES A VENIR (2020-2100) ET QUELLES SONT LES REPERCUSSIONS POSSIBLES ?

Depuis plusieurs décennies, nous observons déjà une augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux sur tous les continents (Bowman et al., 2009; Forsyth et Van Wilgen, 2008; Lohman et al., 2007; Westerling et al., 2006a), y compris en région Méditerranéenne (Moriondo et al., 2006). Ceci est dû à l'augmentation de la sécheresse estivale ainsi qu'à l'augmentation des sources d'ignitions (en majorité humaines) suite à l'augmentation des interfaces zones urbanisées / forêts (Calviño-Cancela et al., 2017; Curt et al., 2007; Davis et al., 2016). Il est donc nécessaire de prévoir les changements à venir sur les régimes de feux et leurs conséquences possibles.

Notre approche combinera les résultats de simulations du danger de feux (incluant l'aléa *via* le MDC et la longueur de la saison de feux) calculés pour les prochaines décennies en fonction de deux scénarios de trajectoires du forçage radiatif « Representative Concentration Pathway » (RCP) développés par le GIEC (Meinshausen et al., 2011; Moss et al., 2008, 2010; van Vuuren et al., 2011) que nous comparerons aux valeurs d'aléas incendies déjà obtenues pour l'Holocène en répondant à la question de la section 2.2. Parce qu'elles fournissent une perspective à long terme des changements de paysages, des dynamiques de végétations et de l'histoire des feux, les données paléoécologiques sont utilisées dans cette section comme bases historiques indépendantes des simulations pour mieux comprendre et appréhender les changements à venir (Lestienne et al., 2017).



---

---

**Chapitre II.**  
**MATERIELS & METHODES**

---

---

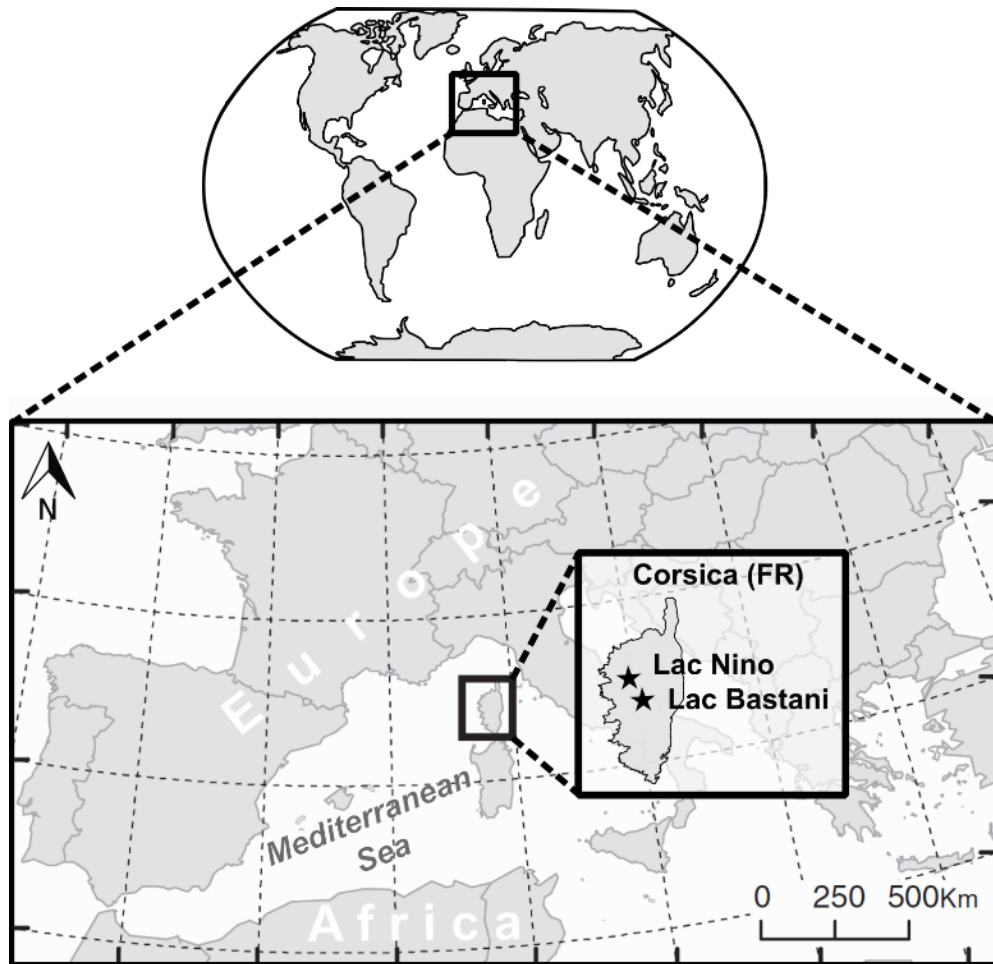


## 1. SITES D'ETUDES

La Corse (**Figure II.1**) est la plus grande île française en Méditerranée, située approximativement à 80 kms des côtes italiennes et à 160 kms des côtes françaises. L'île ne présente aucun glacier ni neige permanente malgré les hautes montagnes présentent en son centre qui peuvent dépasser 2000 m d'altitude (Conchon, 1986).

La végétation Corse a subi de nombreux changements au cours de l'Holocène. Après une période dominée par les herbacées à la fin du Pléistocène (Reille et al., 1997), les arbres ont occupé de plus en plus d'espace sur l'île au début de l'Holocène. Le pin, et en particulier le pin noir (*Pinus nigra*, R. Legay, 1785), était alors l'espèce dominante et sa présence est attestée avant même le début de l'Holocène, il y a 13200 cal. BP ans (Leys et al., 2014; Reille et al., 1999). A partir de 9500 ans cal. BP, la population de bruyère, représentée majoritairement par la bruyère arborescente (*Erica arborea*, L., 1753) a augmenté avant qu'une forte diversification se mette en place dès 7500 ans cal. BP, initiée avec le développement des chênaies dominées par les chênes verts et blancs (*Q. ilex*, L., 1753 et *Q. pubescens*, Willd., 1769), puis l'apparition et le développement progressif de la plupart des espèces que nous connaissons aujourd'hui comme l'olivier (*Olea europea*, L., 1753) dès 6000 ans cal. BP ou plus récemment le châtaigner (*Castanea sativa*, Mill., 1768) il y a 1000 ans (Reille, 1992a; Reille et al., 1999).

Les archives sédimentaires étudiées dans ce mémoire proviennent de deux lacs d'altitude (Gauthier et al., 1983): Bastani et Nino (**Tableau II-1**). Le lac de Bastani (42°30' N, 9°80' E) est l'un des plus hauts lacs Corse (2089 m d'altitude). Son bassin versant étant très réduit, et en raison de sa topographie escarpée (Conchon, 1988; Roche et Loyer-Pilot, 1989), la sédimentation de ce lac est dominée par les apports éoliens et à ce titre est un bon capteur des dynamiques environnementales régionales (Sabatier et al., communication personnelle). Le lac Nino (42°25' N, 8°94' E) est le plus grand lac naturel de Corse avec une superficie de 64800m<sup>2</sup> et se situe à 1748m d'altitude. Son bassin versant est essentiellement composé de pozzines (Gauthier et al., 1983), définies comme des tourbières acides très planes constituées de végétaux hygrophiles et méso-hygrophiles qui forment un tapis dense de 5 à 10cm d'épaisseur (Chouard, 1935).



**Figure II.1** – Localisation géographique des zones d'études : le lac Nino ( $42^{\circ}25'N$ ,  $8^{\circ}94'E$ ) et le lac Bastani ( $42^{\circ}30'N$ ,  $9^{\circ}80'E$ ).

**Tableau II-1** - Principales caractéristiques des lacs étudiés en Corse et détails des échantillonnages et datations effectués. A titre informatif, ces caractéristiques ont également été renseignées pour le lac Creno, étudié par B. Leys (Leys, 2012; Leys et al., 2013) et dont les données ont été utilisées dans le chapitre IV.

	Lac Bastani	Lac Nino	Lac Creno
<b>Implications dans les chapitres</b>	1, 2	2	2
<b>Surface du lac (m<sup>2</sup>)</b>	43 800	64 800	15 000
<b>Surface du bassin versant (km<sup>2</sup>)</b>	0,17	1,121	0,23
<b>Nombre de dates <sup>14</sup>C</b>	10	18	11
<b>Nombre de dates <sup>210</sup>Pb et <sup>37</sup>Cs</b>	2	0	8
<b>Résolution d'échantillonnage des pollens (cm)</b>	4	/	/
<b>Résolution d'échantillonnage des charbons (cm)</b>	1 et 0,5	1	0,5
<i>Références</i>	(Gauthier et al., 1983; Reille et al., 1999)	(Gauthier et al., 1983; Reille et al., 1999)	(Gauthier et al., 1983; Leys, 2012; Reille et al., 1999)



## 2. ÉCHANTILLONNAGE ET RECONSTRUCTIONS PALEOECOLOGIQUES

Cette thèse s'appuie sur des reconstitutions paléoécologiques ainsi que sur de la modélisation des dangers de feux combinant l'aléa incendies (i.e. conditions météorologiques propices au départ du feu) et la longueur de saison des feux. Cette section détaille les analyses paléoécologiques effectuées dans cette thèse.

### 2.1. ÉCHANTILLONNAGE ET DATATION

Deux sites ont été spécifiquement échantillonnés pour cette thèse : le lac Bastani et le lac Nino en Corse (**Figure II.1**). Les sédiments lacustres ont été extraits à l'aide d'un carottier à piston et d'une barge UWITEC au centre des lacs et les séquences mesurent respectivement 2 et 7 m de long depuis l'interface eau/sédiment au sommet de la séquence jusqu'à la base.

La chronologie du lac Bastani (**Tableau II-1**) a été obtenue grâce à la combinaison de i) 10 dates radiocarbone  $^{14}\text{C}$  mesurées au laboratoire de Poznań sur la base de divers macrorestes terrestres (feuilles, graines, charbons et bois) ; ii) un âge estimé pour la transition Tardiglaciaire/Holocène *via* la stratigraphie des pollens et les données géochimiques ; et iii) 2 dates basées sur les mesures de décroissance radioactive du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  pour le haut de la carotte .

La chronologie du lac de Nino (**Tableau II-1**) a été obtenue uniquement grâce à 18 dates radiocarbone  $^{14}\text{C}$  réalisées au laboratoire de Poznań également sur la base de divers macrorestes terrestres (feuilles, graines, charbons de bois).

Sur la base de ces marqueurs chronologiques, le package Clam de R (Blaauw, 2010) a été utilisé pour générer des modèles âge profondeurs dans un intervalle de confiance de 95%.

## 2.2. RECONSTITUTION DES FEUX VIA LES CHARBONS DE BOIS

L'analyse des charbons de bois dans un cadre chronologique contraint par des datations permet de reconstruire la dynamique des feux sur le long terme (Whitlock et Larsen, 2002). Des échantillons de 1cm<sup>3</sup> ont donc été prélevés tous les centimètres (ou demi-centimètres pour le lac Bastani, soit 618 échantillons pour Nino et 271 pour Bastani) (**Tableau II-1**) et ont été traités au HCl et H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pour désagréger et dissoudre la matrice sédimentaire carbonatée et organique non carbonisée, et mieux observer le contenu en charbon de bois (N. Rhodes, 1998; Whitlock et Larsen, 2002). Les culots ont ensuite été tamisés à 150 µm pour Nino et 80 µm pour Bastani car nous avons estimé que ce lac capterait moins de charbons étant donné son emplacement et qu'il fallait donc maximiser la détection des particules de charbon, aussi petites soient elles.

Chaque échantillon a ensuite été observé/photographié avec le microscope Keyence VHX-5000 au grossissement x100. Les images ont été assemblées *via* le logiciel intégré au microscope Keyence VHX-5000 pour observer l'échantillon complet avec une haute précision. A partir de ces images, et en ajoutant des informations sur les caractéristiques visuelles des charbons (couleurs et luminosité), le logiciel est capable de compter de manière semi-automatique les particules de charbons présentes dans l'échantillon et il fournit des mesures précises pour l'aire, le périmètre, la longueur et la largeur de chaque particule.

Le signal charbon a été quantifié en calculant le taux d'accumulation des charbons (« CHAR » pour CHarcoal Accumulation Rates) qui correspond à la quantité de charbon par volume de sédiment et par unité de temps en accord avec le taux de sédimentation estimé par le modèle âge-profondeur. Le CHAR a été calculé en fonction du nombre (CHAR<sub>nb</sub>) et de l'aire totale des charbons (CHAR<sub>ar</sub>) pour chaque échantillon. La comparaison de ces deux unités de mesures fournit une information sur la taille moyenne d'une particule pour chaque échantillon. Les pics de charbons, correspondant à des quantités significatives, ont ensuite été identifiés grâce à l'emploi du logiciel Char Analysis (Higuera et Higher, 2009). La morphologie des particules de charbons a quant à elle été quantifiée pour renseigner le type de biomasse brûlée (Enache et Cumming, 2006; Leys et al., 2017; Mustaphi et Pisaric, 2014). Dans cette thèse, nous avons utilisé le ratio normalisé longueur/largeur (« W/L » pour width/length). Un ratio positif est caractéristique d'une particule « compacte » alors

qu'un ratio négatif correspond à une particule « allongée » (Enache et Cumming, 2006). Nous avons également testé l'intérêt d'un nouveau ratio : le ratio aire/périmètre (« A/P » pour area/perimeter), pour lequel les valeurs positives indiquent que nous avons à faire à une particule « géométrique » tandis qu'un ratio négatif est caractéristique d'une particule à contour « irrégulier ». Bien que déjà utilisé dans d'autres contextes (ex : pour caractériser des surfaces de feux afin de comprendre leurs comportements (Catchpole et al., 1992; Salvador et al., 2005; Wagner, 1969)), ce ratio est testé ici sur les charbons de bois pour la première fois.

## 2.3. RECONSTITUTION DE LA VEGETATION ET DE L'UTILISATION DES TERRES VIA LE POLLEN ET LES SPORES DE CHAMPIGNONS

### 2.3.1. ANALYSES PRINCIPALES

L'étude du pollen et des spores de champignons a été réalisée par Isabelle Jouffroy-Bapicot (ingénieure de recherche au laboratoire Chrono-Environnement) et Déborah Laysenne (stagiaire de Master 2 au cours de l'année universitaire 2016-2017).

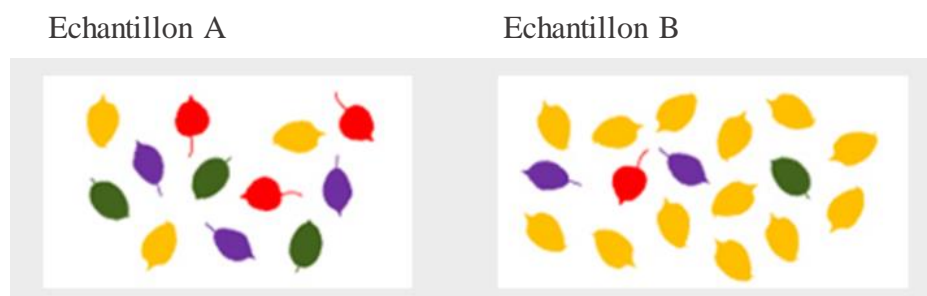
L'étude des pollens permet de reconstruire la composition et la dynamique de la végétation sur le long terme (Bennett et Willis, 2001). De plus, la présence de certaines espèces caractéristiques (les plantes cultivées par exemple) nous informe sur certaines activités humaines (Behre, 1981). A ceci ajoutons l'étude des spores de champignons qui elle aussi nous donne des clefs de compréhension sur d'autres activités humaines de l'époque. En effet, l'espèce la plus communément étudiée est *Sporormiella sp.* (e.g. Jouffroy-Bapicot et al. 2013; Etienne et Jouffroy-Bapicot 2014; Lestienne et al. 2019). Ce champignon se développant sur les fèces d'herbivores, une augmentation subite de la concentration de ses spores dans les sédiments est généralement interprétée comme un marqueur de pastoralisme (Ejarque et al., 2011; van Geel, 2006). Pour identifier ces proxies dans le cadre de ce travail, les échantillons sédimentaires ont été préparés en suivant la méthode standard d'analyse palynologique (Fægri et al., 1989) qui inclut l'ajout de tablettes de Lycopodes pour estimer les concentrations ( $\text{grains cm}^{-3}$ ) et l'influx ( $\text{grains.cm}^{-2}.\text{year}^{-1}$ ) des pollens et des restes fongiques. Les pollens ont été identifiés (nomenclature de Beug (2003)) en utilisant des clefs taxonomiques et des atlas photographiques, ainsi qu'en les comparant à la collection de références

palynologiques présente au laboratoire Chrono-Environnement. Les pollens comme les restes fungiques ont été comptés sur les mêmes lames (Cugny et al., 2010; Ellis et Ellis, 1985; van Geel, 2006) en utilisant le logiciel libre Polycounter de Nakagawa (disponible en ligne sur <http://polsystems.rits-palaeo.com/index.html#PolyCounter>). Pour un échantillon donné, le comptage des grains de pollen a été stoppé quand la courbe de diversité et le pourcentage du principal taxon se stabilisaient. Pour les spores de champignons, un minimum de 350 spores de lycopodes a été compté pour obtenir la concentration des spores de champignons (Etienne et Jouffroy-Bapicot, 2014). Les valeurs relatives de pollen ont été calculées avec TGView (Grimm, 1991). Les pollen et les spores de champignons ont été regroupés le long d'un gradient temporel en utilisant une analyse stratigraphique avec la fonction CONISS présente dans le logiciel Tilia (Grimm, 1991).

### 2.3.2. ÉVOLUTION DE LA BIODIVERSITE VEGETALE A PARTIR DES POLLENS

L'analyse de redondance (RDA) (Lepš et Šmilauer, 2003; Ter Braak et Smilauer, 2002) est une procédure statistique pour exprimer/expliquer la variance dans un jeu de variables réponses à partir d'un autre jeu de variables (variables explicatives). Deux variables environnementales ont été incluses comme potentiels facteurs explicatifs pour la composition spécifique des pollens : le CHAR pour représenter l'influence possible du feu (e.g. Colombaroli et al., 2009), et la concentration en *Sporormiella sp.* que nous avons considéré comme un marqueur de pâturage et donc un indicateur d'activité anthropique (e.g. Dietre et al., 2012; Ejarque et al., 2011; Etienne et al., 2013; Jouffroy-Bapicot et al., 2013).

Pour estimer les changements de diversité végétale, la diversité pollinique a été mesurée en utilisant la richesse spécifique (Birks et Line, 1992) et l'équitabilité (Hurlbert, 1971) comme illustré dans la **Figure II.2**.



**Figure II.2** - Exemple de mesures de biodiversité et d'interprétation. Dans ce cas illustré, les 2 échantillons (A et B) ont la même richesse spécifique (4 espèces) mais pas la même équitabilité. En effet, chaque espèce représente 25% du total dans l'échantillon A, tandis que l'espèce jaune représente plus de 75% du total dans l'échantillon B. Dans cet exemple, en conclusion, l'échantillon A présente une plus grande biodiversité que l'échantillon B.

La richesse pollinique correspond au nombre d'espèces trouvées dans des échantillons de tailles égales comme estimée par une analyse de raréfaction. C'est une méthode robuste utilisée dans de nombreuses études paléoécologiques, y compris pour le bassin Méditerranéen (Beffa et al., 2016; Colombaroli et al., 2007, 2009; Colombaroli et Tinner, 2013). Les richesses spécifiques ont été estimées en utilisant le package R Vegan (Dixon, 2003).

La probabilité de rencontre interspécifique (« PIE » pour Probability of Interspecific Encounters) a été utilisée comme indice d'équitabilité (Hurlbert, 1971). Cet indice nous donne la probabilité que deux grains de pollens échantillonnés au hasard représentent deux espèces différentes. Il est calculé *via* la formule suivante :

$$PIE = \left( \frac{N}{N-1} \right) \left( 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2 \right)$$

Où  $N$  est le nombre total de taxons et  $p$  la fréquence de chaque taxon dans l'assemblage.

Enfin, le test de corrélation de Spearman (Spearman, 1904) a été utilisé pour obtenir la Co-variation entre les caractéristiques de biodiversité (richesse spécifique et équitabilité) et les facteurs environnementaux (feux et pâturage).

### **3. BASES DE DONNEES ET MODELISATION DE L'ALEA INCENDIE ET DE LA SAISON DES FEUX**

La modélisation du danger de feu présentée dans cette thèse, qu'elle porte sur l'estimation des conditions mensuelles de sécheresse du combustible et définissant l'aléa incendie ou bien sur la longueur de la saison de feu, est exclusivement contrainte par les conditions météorologiques et climatiques et elle permet d'estimer quand et dans quelle mesure ces conditions sont propices ou non aux feux. Ainsi, les données climatiques passées, présentes ou futures (voir ci-dessous) ont été utilisées pour simuler ces deux composantes du danger de feu et comparer les valeurs obtenues aux reconstitutions des fréquences de feux obtenues pour l'Holocène à l'aide des charbons de bois sédimentaires. Les estimations ont également été obtenues pour le futur jusqu'en 2100 sur la base des scénarios du GIEC. La section suivante détaille les bases de données et les modèles utilisés pour simuler l'indice de sécheresse (aléa) et la longueur de la saison des feux.

#### **3.1. DONNEES ACTUELLES DE FEUX**

Les données actuelles de feux proviennent de la base de données Prométhée (<http://www.promethee.com/>) qui renseigne la date d'ignition, la taille et la localisation des feux de forêts qui ont eu lieu depuis 1973 dans les 15 départements du sud de la France, Corse incluse. Nous nous sommes concentrés dans cette thèse sur les feux Corses supérieurs à 50000 m<sup>2</sup> (5 ha) et qui se sont produits entre 1979 et 2016 afin de couvrir la même période que les données climatiques (voir ci-dessous).

## 3.2. DONNEES CLIMATIQUES

### 3.2.1. CONDITIONS ACTUELLES

Les données concernant le climat actuel proviennent de la base de données ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int/>) qui est une analyse atmosphérique mondiale depuis 1979, continuellement mise à jour avec une résolution spatiale d'environ 80km (Dee et al., 2011). A ce titre, la Corse est représentée par 5 pixels.

### 3.2.2. CONDITIONS PASSES

Les simulations paléoclimatiques ont été extraites des simulations HadCM3BL-M1 (**Tableau II-2**). Ce modèle est une variante du modèle plus complexe HadCM3, habituellement utilisé dans le cadre du GIEC et ce depuis le premier rapport (Hall et Valdes, 1997). A partir des valeurs des paramètres de forçage orbitaux (Berger et Loutre, 1991), des concentrations en gaz à effet de serre, et d'autres variables prescrites telles que les températures océaniques de surface, cette version du modèle représente un modèle de complexité intermédiaire. L'avantage premier est que les valeurs prescrites allègent les calculs et le temps de simulation, permettant ainsi d'obtenir une série temporelle de quelques décennies représentatives de l'état d'équilibre en peu de temps. Le second avantage, qui découle du premier, est que de nombreuses conditions passées peuvent ainsi être testées et simulées. Ainsi, la version HadCM3BL-M1 a permis d'obtenir une simulation pour chaque millénaire par exemple jusqu'à 21000 ans BP (Valdes et al., 2017), contrairement aux modèles ou versions de complexité maximale qui ont sur la même période seulement pu simuler les conditions pour le dernier maximum glaciaire et l'Holocène moyen (21000 et 6000 ans BP, respectivement) du fait des temps de calculs extrêmement longs. Les normales climatiques (moyennes mensuelles calculées sur 30 ans) pour les principales variables climatiques (température et précipitation) ont donc été extraites pour les 11 derniers millénaires (centrés sur 11000, 10000, ... 2000 et 1000 ans cal. BP), ainsi que pour la période contrôle représentant la période préindustrielle (0 BP mais équivalent au forçage orbital de 1750). Nous avons ensuite calculé les anomalies de températures et de précipitations pour chaque millénaire par rapport à la période contrôle (Ramstein et al., 2007). Ces anomalies ont ensuite été appliquées à la période actuelle, définie à partir des données obtenues *via* ERA-Interim (80 x 60 km de résolution, 5 pixels pour

la Corse). Ce faisant, nous avons donc effectué une descente d'échelle (i.e. downscaling en anglais) depuis la résolution du modèle climatique (**Tableau II-2**) à celle de ERA-Interim, et reconstruit le climat passé de l'île pour chaque millénaire de l'Holocène (Hély et al., 2010; Ramstein et al., 2007). Les données d'insolation (Berger et Loutre, 1991), calculées pour tout l'Holocène et utilisées dans le chapitre V, ont été extraites *via* l'Administration Atmosphérique et Océanique Nationale (<https://www.noaa.gov/>).

### 3.2.3. CONDITIONS FUTURES

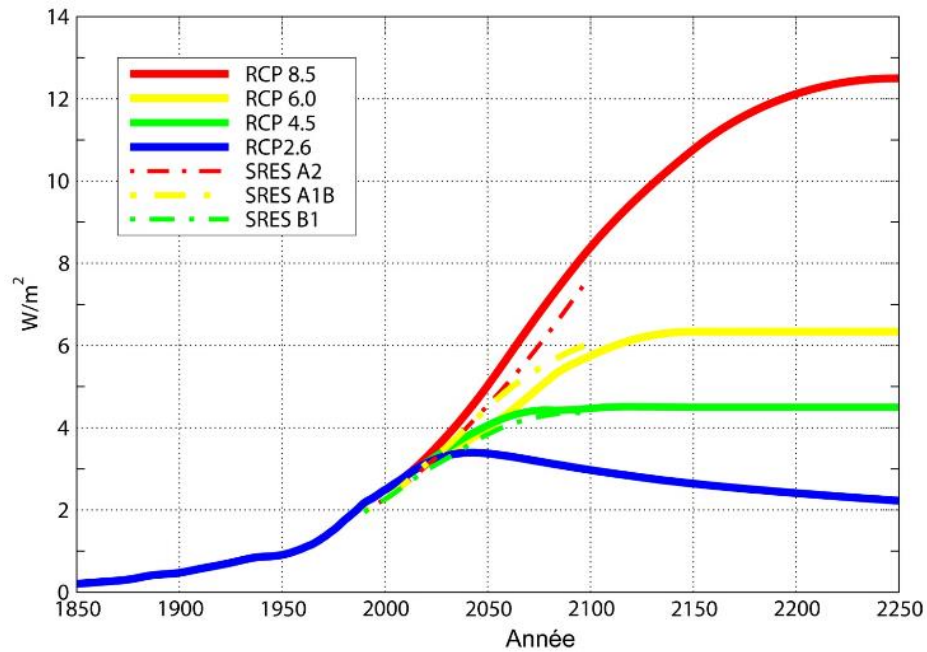
Les projections climatiques futures ont été obtenues à partir des simulations de cinq modèles climatiques réunis dans le consortium CMIP5 (**Tableau II-2**) et comparées aux variabilités historiques obtenues par ERA-interim (1979-2016). Les projections climatiques utilisées sont basées sur deux scénarios RCP développés pour le 5<sup>ème</sup> rapport d'activités du GIEC (Moss et al., 2008, 2010). Les scénarios RCP ont été développés par des climatologues du GIEC (Meinshausen et al., 2011; Moss et al., 2008, 2010; van Vuuren et al., 2011) et représentent l'évolution des concentrations atmosphériques des principaux Gaz à Effet de Serre (dioxyde de carbone ou CO<sub>2</sub>, méthane ou CH<sub>4</sub>, protoxyde d'azote ou N<sub>2</sub>O etc.), d'aérosols et de gaz chimiquement actifs sur la période 2006-2100, avec une extrapolation jusqu'à 2300. Chaque RCP est nommé en fonction du surplus de forçage radiatif qui atteindra la surface du globe par unité de surface en 2100 (2.6, 4.5, 6.0 et 8.5 Watts/m<sup>2</sup>, respectivement) (Meinshausen et al., 2011; van Vuuren et al., 2011). Ces scénarios remplacent les quatre scénarios originaux (SRES A1, A2, B1 et B2).

Deux scénarios ont été utilisés dans cette thèse : RCP4.5 et RCP8.5. Le scénario RCP4.5 est proche du scénario SRES B1 (**Figure II.3**). Ce scénario estime qu'il y aura un pic mondial concernant le forçage radiatif (4.5 W.m<sup>-2</sup>) et la concentration des gaz à effet de serre (notamment 660 CO<sub>2</sub> équivalent (ppm)) autour de 2040/2050, puis les conditions se stabiliseront jusqu'à 2100 (Thomson et al., 2011). Ce scénario, relativement « optimiste » considère une croissance démographique jusqu'au milieu du siècle suivi d'un déclin, le développement d'une économie de services et d'information, l'utilisation d'énergies « propres », la recherche de solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale et une plus grande équité (Guivarch and Rozenberg, 2013). Le scénario RCP8.5 (**Figure II.3**)



est le plus pessimiste et se rapproche du scénario SRES A2 (Guivarch and Rozenberg, 2013). Il a été construit en considérant un monde très hétérogène, une augmentation constante de la population mondiale et avec une orientation régionale du développement économique. Dans ce scénario, le forçage radiatif et les émissions de gaz à effet de serre continueront d'augmenter jusqu'à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle et dépasseront respectivement  $8.5 \text{ W.m}^{-2}$  et 1370 ppm de  $\text{CO}_2$  (Riahi et al., 2011). Le point central de la nouvelle architecture de ces scénarios est l'idée que ces trajectoires de forçage radiatif ne sont pas associées à un scénario unique d'émissions des gaz à effet de serre ou à un scénario socio-économique unique, mais peuvent au contraire résulter de différentes combinaisons d'évolutions économiques, technologiques, démographique et institutionnelles futures (Guivarch and Rozenberg, 2013; van Vuuren et al., 2011).

Les moyennes mensuelles pour les principales variables climatiques (température et précipitation) ont été extraites pour chaque décennie jusqu'à 2100. Nous avons ensuite calculé les anomalies de températures et de précipitations pour chaque décennie par rapport à la période contrôle (Ramstein et al., 2007). Ces anomalies ont ensuite été appliquées aux moyennes de la période actuelle (1979-2016) définie à partir des données obtenues *via* ERA-Interim pour construire les conditions moyennes décennales à venir.



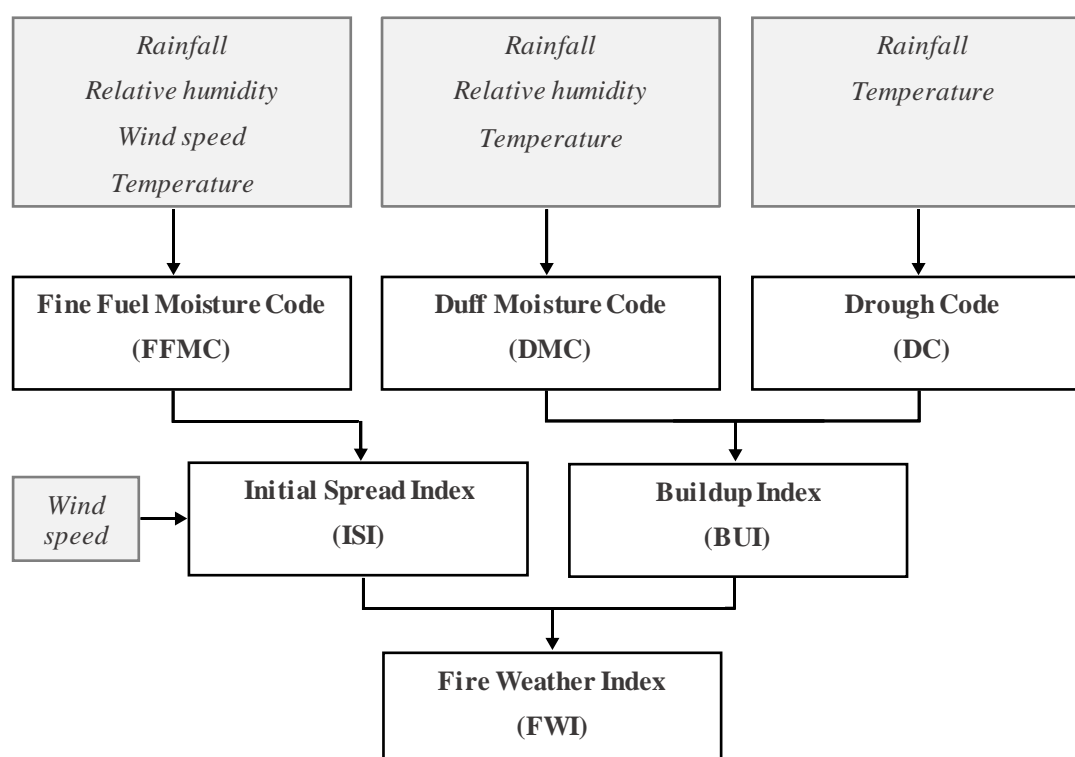
**Figure II.3** - Evolution du surplus de forçage radiatif émis par la surface du globe (énergie en  $W/m^2$ ) d'ici à 2250 en fonction des différents scénarios de l'IPCC et de leurs équivalences (couleurs) selon ceux de première génération (les SRES) ou de deuxième génération (RCP) actuellement utilisés (Meinshausen et al., 2011; van Vuuren et al., 2011).

**Tableau II-2** - Résumé des modèles climatiques utilisés dans cette thèse pour les périodes passées et futures.

	Nom du modèle	Résolution		Implication dans la thèse	Références
		Atmosphérique	Océanique		
<b>Passé</b>	HadCM3BL-M1	$3,75^\circ \times 2,5^\circ$	$3,75^\circ \times 2,5^\circ$	Chapitre IV	<i>Valdes et al., 2017</i>
	FGOALS_S2	$1,65^\circ \times 2,8^\circ$	$1^\circ \times 1^\circ$		<i>Bao et al., 2013</i>
	CanESM2	$2,8^\circ \times 2,8^\circ$	$1^\circ \times 1,4^\circ$		<i>Chylek et al., 2011</i>
<b>Futur</b>	MIROC_ESM_CHEM	$2,8^\circ \times 2,8^\circ$	$1^\circ \times 1,4^\circ$	Chapitre IV	<i>Watanabe et al., 2011</i>
	MIROC5	$1,4^\circ \times 1,4^\circ$	$0,5^\circ \times 1,5^\circ$	Chapitre V	<i>Watanabe et al., 2010</i>
	MRI_CGM3	$1,1^\circ \times 1,1^\circ$	$0,5^\circ \times 1^\circ$		<i>Yukimoto et al., 2012</i>

### 3.3. MODELISATION DE L'ALEA INCENDIE

Le Fire Weather Index (FWI, van Wagner 1987), fait partie du système canadien de quantification du danger de feu dans les forêts (« CFFDRS » pour Canadian Forest Fire Danger Rating System) qui a été développé au Canada depuis 1968 (Stocks et al., 1989). Le FWI procure quotidiennement des valeurs numériques relatives à l'aléa incendie (probabilité de départ de feux et conditions initiales de propagation) obtenues à partir des données météorologiques « instantanées » mesurées à midi (heure locale) de température (TEMP), humidité relative (RH), vitesse du vent (WS), et du cumul des précipitations au cours des 24 heures précédentes (PREC). Le FWI calcule six composantes qui correspondent à différents aspects de l'aléa lié au départ d'incendie, résumés dans la **Figure II.4**.



**Figure II.4** – Diagramme du Système FWI avec les variables en entrée (boîtes grises) et les différents indices calculés (boîtes blanches) d'après Van Wagner (1987)

Les trois premières composantes du FWI (**Figure II.4**) sont des indices d'humidité du combustible. Le FFM (Fine Fuel Moisture Code) correspond à l'humidité de la couche superficielle de l'humus, le DMC (Duff Moisture Code) correspond à l'humidité de la couche de fermentation (couche intermédiaire d'humus) et le DC (Drought Code) renvoie à l'humidité de l'humus proprement dit, soit la couche profonde de matière organique juste au-dessus de l'horizon A1 du sol. Par analogie, ces trois indices et leur cinétique correspondent également aux combustibles de surface, organisés en classes de diamètres croissants, pour lesquels la dessiccation et l'humidification sont de moins en moins rapides, le DC correspondant aux combustibles les plus gros et les plus lents à sécher. Les trois autres composantes sont relatives au comportement initial du feu après ignition, et renseignent respectivement la vitesse de propagation du feu (ISI, Initial Spread Index), la quantité de combustible disponible pour brûler (BUI, Buildup Index) et l'intensité du feu (FWI, Fire Weather Index).

Pour vérifier leur aptitude en tant que marqueurs des feux méditerranéens, tous les indices du FWI ont été calculés sur la Corse pour le présent (1979-2016) et comparés aux feux survenus en Corse sur la même période et archivés dans la base de données Prométhée. Toutefois, l'un des objectifs initiaux de cette thèse était également de développer une méthode utilisable dans le passé en Méditerranée. Dans cette perspective, et parce les données vents et humidité relative ne sont pas forcément disponibles ou représentatives à l'échelle de l'Holocène, nous avons décidé de nous focaliser seulement sur le DC, car cet indice ne nécessite que les données de température et de précipitations, ainsi que sur un indice similaire, le MDC (Girardin et Wotton, 2009), développé également au Canada et inspiré du DC, et déjà largement utilisé dans cette partie du monde (Bergeron et al., 2011; Bürger, 2013; Girardin et Wotton, 2009). Cet indice du MDC a en effet a priori le grand avantage de permettre l'utilisation de données mensuelles de précipitations et températures, usuellement disponibles dans les données extraites des simulations climatiques passées, présentes, ou futures. Pour vérifier leurs pertinences, le MDC et le DC mensuel moyen (=moyennes des DC quotidiens) ont été calculés et comparés. Pour vérifier leur aptitude en tant que marqueurs des feux méditerranéens, tous les indices du FWI ont été calculés à partir des pixels ERA-interim couvrant la Corse pour le présent (1979-2016) et comparés aux feux survenus en Corse sur la même période et archivés dans

la base de données Prométhée (refweb). Toutefois, l'un des objectifs initiaux de cette thèse était également de développer une méthode utilisable dans le passé. Dans cette perspective, et parce les données vents et humidité relative ne sont pas forcément disponibles ou représentatives à l'échelle d'un millénaire, nous avons décidé de nous focaliser seulement sur le DC, car cet indice ne nécessite que les données de température et de précipitations, ainsi que sur un indice similaire, le MDC (Girardin et Wotton, 2009), développé également au Canada et inspiré du DC, et déjà largement utilisé dans cette partie du monde (Bergeron et al., 2011; Bürger, 2013; Girardin et Wotton, 2009). Cet indice du MDC a en effet a priori le grand avantage de permettre l'utilisation de données mensuelles de précipitations et températures maximales, usuellement disponibles dans les données extraites des simulations climatiques passées, présentes, ou futures. Pour vérifier leurs pertinences, le MDC et le DC mensuel moyen (=moyennes des DC quotidiens) ont été calculés et comparés.

### 3.4. CALCUL DES SAISONS DE FEUX

Sur la base des analyses historiques des valeurs de DC et MDC, et en adaptant la méthode de Hély et al. (2010) développée pour DC au MDC, une valeur minimale de MDC correspondant à un aléa de feux élevé a d'abord été défini, puis a été utilisé pour calculer et reconstruire la longueur de saison de feux pour chaque millénaire au cours de l'Holocène. Le pas de temps quotidien a été utilisé et combiné au MDC afin de déterminer le nombre de jours potentiellement inclus durant les mois de transition (début et fin de la saison de feux).





---

---

## Chapitre III.

### LES FEUX ET LES ACTIVITES HUMAINES SONT LES FACTEURS CLEFS DE LA GRANDE DIVERSITE VEGETALE EN CORSE

---

---

**Fires and human activities as key factors of the high diversity of Corsican vegetation.**

**Marion Lestienne**<sup>1,6</sup>, Isabelle Jouffroy-Bapicot<sup>1</sup>, Déborah Leysse<sup>1</sup>, Pierre Sabatier<sup>2</sup>, Maxime Debret<sup>3</sup>, Pierre-Jean Albertini<sup>4</sup>, Daniele Colombaroli<sup>5</sup>, Julien Didier<sup>1</sup>, Christelle Hély<sup>6,7</sup>, and Boris Vannière<sup>1,8</sup>

<sup>1</sup>Chrono-environnement, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

<sup>2</sup>Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

<sup>3</sup>Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière, UMR 6143, Université de Rouen, France

<sup>4</sup>Collectivité territoriale de Corse, Assemblée de Corse, 20187 Ajaccio, France

<sup>5</sup>Department of Geography, Royal Holloway, University of London, Egham, TW20 0EX, UK

<sup>6</sup>ISEM, Université Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France

<sup>7</sup>EPHE, PSL University, Paris, France

<sup>8</sup>MSHE Ledoux, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France





## RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATIONS

12000 ans d'histoire des feux, de la végétation et des activités humaines ont été reconstruits en Corse *via* les charbons, les grains de pollen et les spores de champignons présents dans les sédiments du lac de Bastani. Ces résultats ont été analysés et comparés aux résultats obtenus avec les lacs de Creno et de Nino.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à l'évolution du paysage Corse au cours de l'Holocène. Ainsi, le grand nombre de pics de charbons enregistrés au début de l'Holocène atteste d'un régime de feu soutenu qui s'explique par l'augmentation du combustible disponible ainsi que par les conditions estivales particulièrement sèches. Cette période est caractérisée par la dominance du pin (*Pinus sp.*) et par une richesse pollinique faible. La période suivante (9500 et 7500 ans cal. BP) est caractérisée par une augmentation des bruyères (*Erica sp.*), particulièrement adaptées aux feux fréquents. Cette association entre pin et bruyère correspond probablement à un état de transition entre une forêt et un environnement plus ouvert. Un évènement majeur, associé à la fois à l'Homme et au climat, survient après 7500 ans cal. BP durant lequel le pourcentage de grains de pollen de pins s'effondre. Au même moment les feux diminuent et permettent l'expansion des chênaies (en particulier *Q. ilex* et *Q. pubescens*). Durant la période suivante (après 5000 ans cal. BP), les augmentations de *Sporormiella sp.* et des grains de pollen associés aux plantes anthropiques (ex : céréales, plantain etc.) soulignent l'augmentation des activités humaines typiques de la période Néolithique. Après 1800 ans cal. BP, l'augmentation de *Sporormiella sp.* est plus rapide. Enfin, après 800 ans cal. BP, l'impact humain est de plus en plus visible (augmentation de *Sporormiella sp.* et des pollens de plantes cultivées) et peut s'expliquer par l'importante immigration en provenance de Toscane ayant eu lieu à cette époque. Ces activités ont modelé le paysage en augmentant la fréquence des feux et en ouvrant le milieu.

Dans la seconde partie de l'étude, nous avons comparé les régimes de feux observés à l'aide de la morphologie des charbons de bois retrouvés (Longueur / largeur, aire / périmètre et taille des particules). Trois périodes principales de régimes de feu soutenus ont été mis en évidence dans nos résultats. La première période s'étend de 11500 à 6500 ans cal. BP et est caractérisée par un nombre de charbons très élevé avec des particules majoritairement petites, géométriques et peu allongées. Ceci peut

s'expliquer par un remaniement important des charbons, par des charbons arrivant de loin et / ou par un combustible majoritairement ligneux. Le régime de feu soutenu de cette période est observé dans tous les sites Corses déjà étudiés et correspond probablement à une tendance générale. La seconde période (5000 à 1800 ans cal. BP) est caractérisée par des gros charbons, allongés et non dentés, qui reflètent un combustible plus herbacé et un signal plus local induit par le développement des activités humaines. Enfin, la troisième et dernière période couvre les derniers siècles et est caractérisée par de petits charbons plus géométriques et moins allongés, reflétant probablement un changement de type de combustible dans les feux anthropiques.

Dans la troisième et dernière partie de ce travail, nous avons étudié l'évolution de la biodiversité végétale et son lien avec le feu et l'Homme à des échelles temporelles différentes. Nos résultats ont montré que la richesse spécifique augmentait au cours de tout l'Holocène. En regardant le lien entre feu et diversité végétale, nous remarquons qu'un environnement soumis au feu est plus diversifié qu'un environnement sans feu. Néanmoins, lorsque le CHAR est au-dessus de  $0.5 \text{ \#/cm}^2/\text{yr}^1$ , la diversité diminue. Ainsi, nos résultats sont tout à fait compatibles avec l'hypothèse de la perturbation intermédiaire développée par Connell en 1978 puis Fox en 1979. Pour ce qui est des activités humaines, et en particulier du pâturage, nos résultats montrent qu'elles augmentent de façon continue la biodiversité végétale. Toutefois, l'abandon des activités traditionnelles observé depuis quelques décennies entraîne une fermeture des milieux et pourrait ainsi augmenter les surfaces potentielles brûlées, menaçant par la même occasion la diversité végétale. La prochaine étape sera de modéliser le climat passé pour tenter de comprendre le rôle respectif du climat et de l'Homme sur les feux et la végétation.

**Mots-clefs :** Méditerranée, Holocène, Corse, pollen, charbons de bois, spores de champignons, pastoralisme, déforestation, biodiversité

## SHORT ABSTRACT

In the Mediterranean region, Corsica represents one of the most important hotspot of biodiversity, partly due to the high number of endemics species. This region is also one of the most affected by forest fires worldwide. Present vegetation is adapted to a wide range of disturbance regimes but a change in fire frequency or intensity in the future may severely affect ecological resources and other socio-economical aspects. Here, we study the dynamics of vegetation–human–fire interactions for the past 12000 years as recorded by Lake Bastani (Corsica, France). We used well-dated sedimentary records of charcoal, pollen and fungal spores to infer past fire regime, land-cover and pastoral activities respectively and we compared our results with charcoal records from two other Corsican lakes (Nino and Creno, respectively). Our results suggest that climate and natural fires were the main factors shaping the landscape before 5000 cal. BP. Then, the extraordinary diversity of the current Corsican vegetation has been mainly promoted by human activities on the island (i.e. deforestation and pastoralism) at least from the Bronze Age (3500 cal. BP). The top of our record shows a sharp decrease in fungal remains (*Sporormiella*-type), usually associated to pastoral activities, which could be attribute to the land abandonment occurring since few decades.

**Keywords:** Mediterranean, Holocene, Corsica, pollen, charcoal, fungal spores, pastoralism, deforestation, biodiversity

## 1. INTRODUCTION

Mediterranean climate regions represent less than 5% of the Earth's surface, but host almost 20% of the world plant species (Cowling et al., 1996; Quezel, 1999). Located on a latitudinal gradient between temperate European ecosystems and semi-arid/desert subtropical conditions of North-Africa, the Mediterranean basin is characterized by a warm and dry summer season (Pausas, 2004; Sá et al., 2017), making it a fire-prone region (Keeley, 2009; Mouillot et al., 2002, 2003). Within this region, Corsica, belonging to the Tyrrhenian islands, is well known for its biodiversity values, partly due to the high number of endemics species (Médail, 2017; Médail and Verlaque, 1997) making it one of the best preserved Mediterranean forest ecosystems (Médail and Quezel, 1997; Vogiatzakis et al., 2016). For these reasons, it is one of the most susceptible area to climate and disturbance-regime changes (Giannakopoulos et al., 2005; Giorgi, 2006; Vogiatzakis et al., 2016). Currently, we are witnessing an agro-pastoral land abandonment of most the mountain areas of the island (Mouillot et al., 2005; San Roman Sanz et al., 2013). Moreover, a global increase in temperature and drought is predicted for the next decades (Giorgi, 2006; Giorgi and Lionello, 2008; Moriondo et al., 2006; Pausas, 2004). So we can expect an alteration of future fire regime and impacts on biodiversity (Colombaroli and Tinner, 2013; Pausas, 2004; Pausas and Fernández-Muñoz, 2012; Piñol et al., 1998), even if Corsican ecosystems seem well adapted to fire (Leys et al., 2014, 2018b; Mouillot et al., 2008). Indeed, these ecosystems result of a long history of interactions between fire, land use and vegetation under variable climate conditions (Carcaillet et al., 2007; Leys et al. 2012, 2013). However, these interactions are still debated in Corsica and more generally at the regional scale (e.g. Colombaroli and Tinner, 2013; Colombaroli et al., 2009; Connor et al., 2019; Vannière et al., 2011, 2016) and would deserve more studies fed by robust long-term datasets.

In this study, we will try to answer to the following questions: How can we explain the Corsican vegetation composition? Can we observe different fire regimes during the Holocene? Are they linked with particular vegetation pattern? What is the role of humans in driving ecological dynamics? Paleoecological studies are great tools to answer to these questions by permitting the reconstruction of past plant assemblages, fire regimes and human presence, and in order to study their relationship on the long

term socio-ecological trajectories (e.g. Colombaroli et al., 2007, 2008; Lestienne et al., 2017; Vannière et al., 2008).

Reille et al. (1992, 1999) have been the first to reconstruct the Holocene Corsican vegetation from Creno lake sediment record in particular and few others peat sequences. They highlighted the dominance of *Pinus* and *Erica arborea* at the early Holocene, followed by a significant change during the Neolithic, notably with the increase in *Quercus ilex*-type and *Quercus pubescens*-type, which thereafter dominated regional vegetation during most of the Holocene. These authors assumed that changes in climate and possibly fire regime could explain these vegetation changes. Carcaillet et al. (1997) used pedoanthracology to highlight the link between fire and the arrival of *Quercus ilex* in Corsica. These studies were precursors for Corsican history but they suffered from a lack of precise chronology. Later, Leys et al. (2014) investigated once more lake Creno in order to reconstruct past fires and vegetation by using charcoal (local to regional scale) and macro remains (local scale). This study based on well-dated cores focused on *Pinus nigra ssp. laricio* (endemic Corsican species) expansion and demonstrated the presence of this pine during all the Holocene, often combined with deciduous broadleaf trees. Today, we propose to document human impact on Corsican vegetation and fire regime to complete this history of the island. Moreover, no study has ever looked for the biodiversity dynamics in Corsica for the entire Holocene. While conservation problematics are more and more important worldwide, and particularly in the biodiversity hotspots like Corsica, we propose to reconstruct Corsican plant biodiversity dynamics.

The present study focuses therefore on the vegetation diversity, human practices, fire regimes, and their interactions of the past 12000 years in Corsica. For these, we used a high-resolution and well-dated sedimentary record from Bastani lake, which is a 2000-m elevation water body well located to capture a regional signal. Bastani lake is a key study site for Corsica because i) it is a good candidate to capture a signal at the landscape scale due to its high elevation, very restricted watershed and its windward exposure to strong winds (Conchon, 1988; Roche and Loye-Pilot, 1989) and ii) its sedimentation rate is almost constant and the chronology covers all the Holocene. The present study is also based on a multiproxy approach (charcoal, pollen, fungal remains) in order to reconstruct biomass burning, land cover dynamics and land use history of the Monte Renoso area. In addition, we have used an innovative method of

charcoal morphologies calculation. We will discuss the interest of using such method for advancing paleoenvironmental inferences.

Because fire has been a major driving force of Mediterranean region since the emergence of the Mediterranean climate (Médail, 2017), we hypothesize that fires could be one of the factors favouring the maintenance of the high biodiversity characterizing the Mediterranean region.

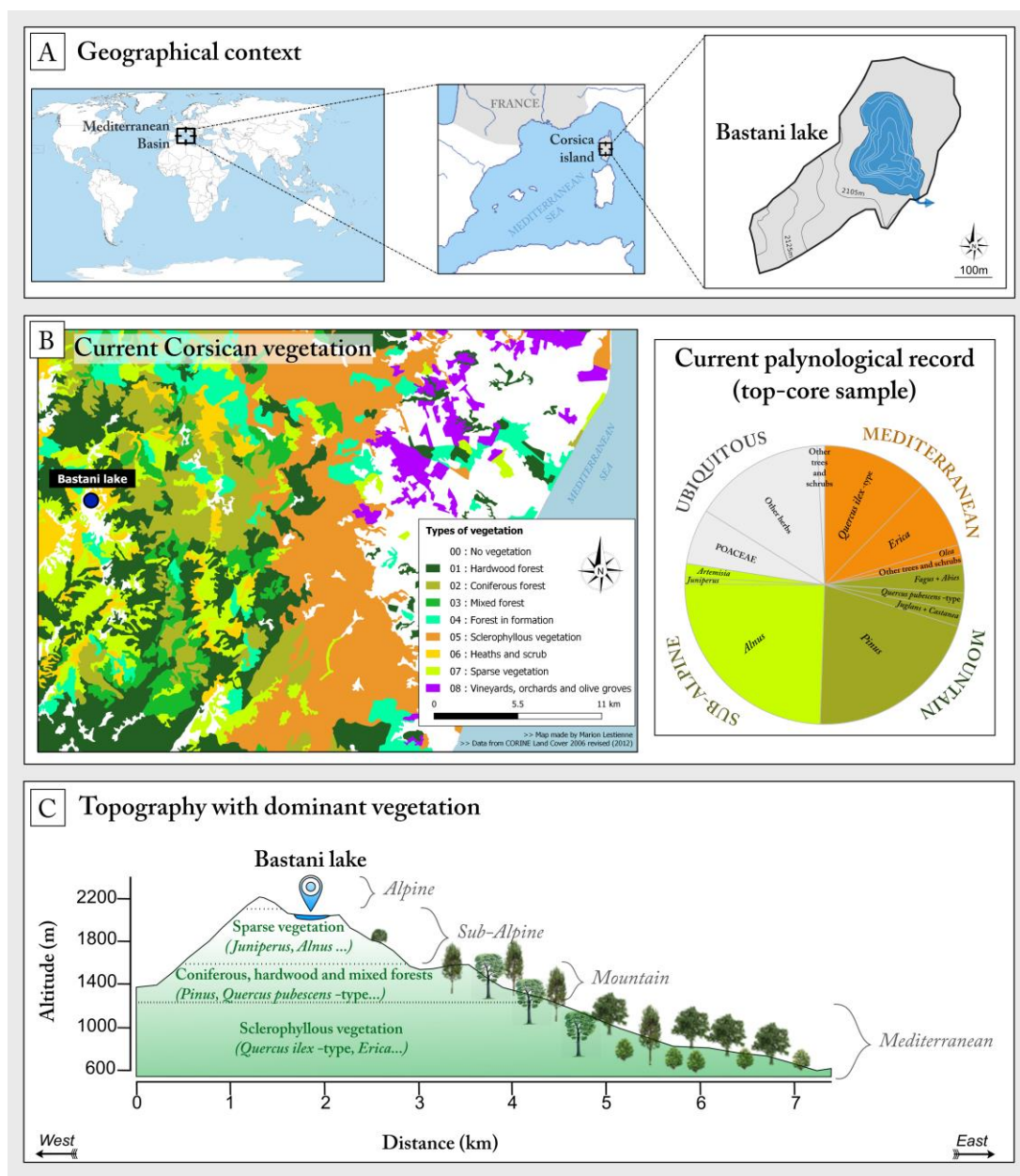
Our data contribute to the global Mediterranean fire knowledge by providing a new quantitative and high-resolution series from a key region in the Central Mediterranean region.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. STUDY AREA

Lake Bastani (42°30' N, 9°80' E) is located in Corsica (France), in front of the Monte Renoso Mountain, and is one of the highest lakes of the island (**Figure III.1a**). This lake covers 43800 m<sup>2</sup> with a maximum depth of 24 meters and has a restricted watershed of 173000 m<sup>2</sup>, mainly composed by granodiorite, containing no permanent streams and delivering very limited local lithogenic input to the lake sediment (BRGM, 2009). It formed behind a glacial cirque dammed by moraine abandoned by the glacier in the Late glacial period (14 000 cal. BP) (Gauthier et al., 1984). Due to the topography, this windward lake is a good captor for wind-transport particles including pollen and charcoals produced in the surrounding regional area (Conchon, 1988; Roche and Loyer-Pilot, 1989). It lies at the boundary between the subalpine and alpine vegetation belts (**Figure III.1b**), and is characterized by cold winter and mild summer (Gamisans, 1999). Grasslands and low shrubby formations of *Alnus viridis subs. suaveolens*, *Juniperus* and *Berberis* compose the surrounding vegetation. Further down in the valley, more and more dense mixed oak forest is composed by *Quercus ilex*, *Quercus pubescens*, *Pinus nigra*, *Erica arborea* and *Arbutus unedo* (**Figure III.1b and c**) (Gauthier et al., 1983; Reille et al., 1997, 1999).





**Figure III.1** - Localization, surrounding vegetation (CNRS Ecolab and CORINE Land Cover 2006 revised (2012)) and topographic section (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) of the lake Bastani region (Corsica, FR).

## 2.2. CORE EXTRACTION

The lacustrine sediment cores were extracted from a floating platform using a UWITEC gravity corer. Two core sections composed the whole record sequence (183 cm) called BAS15-MC (**Tableau III-1**). The chronological control was based on a combination of (i) 10 radiocarbon dates obtained at the Poznan Radiocarbon Laboratory on diverse macro-remains of terrestrial origins (leaves, seeds, charcoals and wood); (ii) one age estimated for the main Lateglacial/early-Holocene transitions indicated by the pollen stratigraphy and the geochemistry data; and (iii) 2 radiometric markers derived from short-lived radionuclides ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) for the top of the core. Based on these chronological markers, Clam package (R software, R. Core Team, 2018) has been used to generate an Age Depth Model (**Tableau III-1**) within a 95% confidence limits (Blaauw, 2010).

**Tableau III-1** - List of core sections used for the Master Core of Bastani lake sequence (BAS15-MC) and sub-sampling bins used for paleoecological discrete analyses.

ID	Depth (cm)	Sampling
BAS15_P1	8-23	half-centimetric
BAS15_P1	23-66	centimetric
BAS15_P6	57-110	centimetric
BAS15_P6	110-185	half-centimetric

## 2.3. CHARCOAL ANALYSIS

271 contiguous sediment samples were retrieved along core BAS15-MC each 10 or 5 mm (depending of the sedimentation rate). For charcoal extraction, each sample was washed on a 80- $\mu\text{m}$  mesh sieve after hydrochloric acid and hydrogen peroxide treatments according to the standardized macro-charcoal sieving method (N. Rhodes, 1998; Whitlock and Larsen, 2002).

All charcoal particles from each sample have been observed with a digital microscope coupled to the high-speed camera Keyence VHX-5000. Images, observed using a 100-magnification, have been assembled to observe the entire sample on one picture with a high precision. From this picture, and adding information on charcoal visual



characteristics (colour and brightness ranges), the microscope software performs a semi-automated counting of charcoal particles present in the sample: each particle corresponding to the colour and brightness ranges chosen are selected and the user checks visually each particle. The Keyence VHX-5000 software also measures the length, width, area and perimeter of each selected particle.

The charcoal record was quantified calculating the Charcoal Accumulation Rates (CHAR), i.e. the quantity of charcoal particles per volume of sediment and per unit of time according to the sedimentation accumulation rate estimated by the depth–age model. Charcoal quantity has been estimated using either the number of charcoal particles per area unit and time unit (“CHAR<sub>nb</sub>”: #/cm<sup>2</sup>/yr), or the total area of charcoal particles per area unit per time unit (“CHAR<sub>ar</sub>”: μm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/yr). The comparison of these two metrics provide an information about the mean charcoal particle size of each sample. Significant charcoal peaks have then been highlighted using the Char\_Analysis software by subtracting the CHAR-background, which represents the variation in overall charcoal production, sedimentation, mixing and sampling, from the CHAR-series (Higuera, 2009). The morphology of charcoal particles has also been quantified to inform about the type of biomass burned (Enache and Cumming, 2006; Leys et al., 2017; Mustaphi and Pisaric, 2014; Umbanhowar and Mcgrath, 1998). In this study, we measured the commonly used normalized width vs. length ratio (W/L). A positive ratio shows “compact” particle, and a negative ratio shows an “elongated” particle (Enache and Cumming 2006). Using the high precision microscope allowed us to define a new proxy to describe the charcoal shape complexity by measuring the normalized area vs. perimeter ratio (A/P). A positive ratio shows that the particle is “geometric”, and a negative ratio shows that the particle is “indented”. Because these measures are rarely studied, a short synthesis, as exhaustive as possible, seemed to be appropriate to introduce our results.

The first meaningful study about the morphology of charcoal particles has been performed by Patterson et al. (1987). They studied the size of charcoal particles by comparing it to the potential distance that the particle could travel: The smaller particle, the longer the distance it can travel from the place it was produced, adding the influence of the wind on the charcoal particles distribution. Moreover, the proximity of several fires can bias the observer. Later, it was showed that small particles reflect a regional signal whereas bigger particles reflect a more local signal

(Clark and Royall, 1995a). More recent studies (e.g. Ali et al., 2009; Carcaillet et al., 2001; Leys et al., 2013; Whitlock and Larsen, 2002) have suggested that the differences in charcoal sizes retrieved in sediments are mainly due to fire type (crown or surface fires) and taphonomical processes, including charcoal transportation.

In parallel, Umbanhowar and Mcgrath (1998) used the charcoal morphology as an indicator of the vegetation type in the Minnesota forests (U.S.A.). To quantify the different morphotypes, they used the Width/Length ratio and found that elongated particles (normalized ratio  $< 0$ ) would correspond to herbaceous fuels, when intermediate W/L ratio would correspond to charcoal derived from leaves or wood. Since then, several authors added their contribution by developing classifications of the different charcoal morphologies. Among them, Jensen et al., (2007) defined five common charcoal morphotypes and by comparing them with charcoals from prescribed burns of modern plant material. From this experience, they concluded that grass cuticles, conifer wood, and leaves of some broadleaved taxa produce different and recognizable charcoal types. Similarly, Enache and Cumming (2007) defined seven distinct morphological types of charcoals. In contrary to the previous study, they assume that charcoal morphologies are related to the bio-geo-climatic and lake watershed characteristics and so they suggest that they can provide insights on past fire and climate. From these two founding studies, Mustaphi and Pisaric (2014) have developed a new classification of 27 charcoal morphotypes. Beyond their conclusions, we can note that some morphotypes can easily be attributed to specific fuel. It is the case for elongated charcoals, which can correspond to grass, and for porous charcoals, which can correspond to needles, grass, or leaves. Some morphotypes can also be used as an indicator of the kind of signal and/or of the kind of transport. For example, a morphotype that presents an indented shape and/or that is associated to fragile fuel as leaves can also reflect a local signal and a lower transport energy regime (Vannière et al., 2003).

## 2.4. POLLEN AND FUNGAL REMAINS ANALYSIS

In parallel to charcoal treatments, sedimentary samples were also prepared according to standard techniques for pollen analysis (Fægri and Iversen, 1989), including *Lycopodium* tablets addition for estimating pollen and fungal spore concentrations (grains cm<sup>-3</sup>) and influx (grains.cm<sup>-2</sup>.year<sup>-1</sup>; Stockmarr 1971). Pollen grains were identified using keys, photographs (Reille, 1992b), and reference to the modern pollen collection at the Chrono-environment Laboratory in Besançon. Nomenclature followed Beug (2003). On the same slides as for pollen, algal and fungal remains, which were the main non-pollen palynomorphs, were identified and counted using available literature (present-day ecology: Ellis and Ellis 1986, palaeoecology: e.g van Geel 2001, van Geel and Aptroot 2006, Cugny et al. 2010). Pollen and fern spores counting was performed using the Polycounter free software from Nakagawa (available on line: <http://polsystems.rits-palaeo.com/index.html#PolyCounter>). For a given sample, pollen grain counts stopped when both, the diversity curve and the main taxa percentages stabilized (min count: 520 and max count: 2900). For the algal and fungal remain counting, a minimum count of 350 *Lycopodium* spores per sample was reached for the assessment of fungal spore concentration (Etienne and Jouffroy-Bapicot 2014). Pollen percentages were based on the sum of dry-ground vascular plant pollen (i.e., total terrestrial pollen or total land pollen; TLP). Relative values of pollen were calculated as a percentage of the TLP sum using the Tilia software (ref), and the relative and influx diagrams were constructed with TGView (Grimm, 1991, 2004). The relative pollen patterns and the fungal remain assemblages were individually divided along the overall temporal sequence into significantly different periods using stratigraphic constrained cluster analysis, with the Tilia CONISS function.

## 2.5. BIODIVERSITY ANALYSIS

Redundancy analysis (RDA; Lepš and Šmilauer, 2003; Ter Braak and Šmilauer, 2002) is a statistical procedure to express how much of the variance in one set of variables (response variables) can be explained by another set of variables (explanatory variables). Two environmental variables were included as possible explanatory factors for the pollen species composition. The first one is the charcoal influx as a fire proxy (e.g. Colombaroli et al., 2009). The second one is the *Sporormiella*-type fungal remain, which is one of the most reliable indicators of herbivory and the most used proxy of pastoral activities (Baker et al., 2013).

To assess the biodiversity changes in the lake surroundings, pollen diversity has been estimated using richness (Birks and Line, 1992) and evenness (Hurlbert, 1971) to encompass both diversity dimensions. Palynological richness correspond to the expected number of taxa found in samples of equal size as estimated by rarefaction analysis. It is a robust method used in many paleoecological studies, including the Mediterranean environments (Beffa et al., 2016; Colombaroli et al., 2007, 2009; Colombaroli and Tinner, 2013). It was achieved in the present study using the Vegan package (Dixon, 2003) of the statistical software R (R.Core Team, 2018) and a constant pollen sum, which was standardized on the minimum pollen sum (n=520).

The probability of interspecific encounters (PIE) was used as an index of evenness (Hurlbert, 1971). This index gives the probability that two randomly sampled pollen grains from a given habitat type represent two different species, and it is calculated as follow:

$$PIE = \left( \frac{N}{N-1} \right) \left( 1 - \sum_{i=1}^s p_i^2 \right)$$

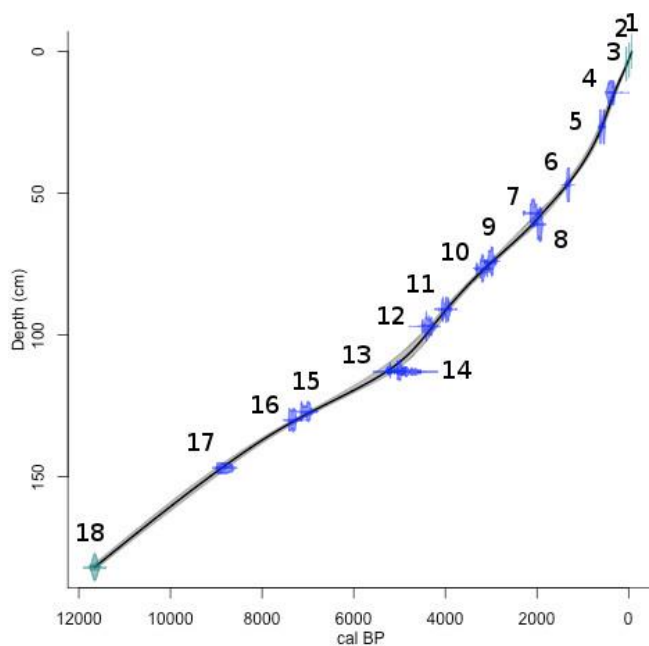
Where  $N$  is the total number of taxa and  $p$  the frequency of each taxon in the assemblage.

Finally, the spearman's rank-correlation (Spearman, 1904) was used to assess the covariation between biodiversity characteristics (i.e. richness, evenness) and environmental factors (fire and pasture). Only main results from these analyses are presented in the results section. Detailed results are presented in annexes.

### 3. RESULTS

#### 3.1. AGE-DEPTH MODEL

The sediment from BAS15-MC is composed by two units, the upper unit (0-180 cm) consists of olive-gray silty clay rich in organic content and a lower unit (180-183 cm) is formed by light gray clay with low organic content. The first unit presents two phases with higher organic content from 170 to 100 cm and over the last 5 cm. Age-Depth Model obtained indicated that the Bastani lake sediment record (183cm) covers the entire Holocene (**Figure III.2**). The oldest part is dated from 11650 cal. BP. There is an average of 68 years on each centimeter (median is 79 years) for the whole Holocene. The unit change corresponds to the Late-glacial/Holocene transition. The accumulation rate is constant around 0.01 cm/yr between the beginning of the Holocene and 1600 cal. BP. Between 1600 and 500 cal. BP, there is an accumulation rate increase from 0.01 to 0.06 cm/yr. Then it decreases until 0.03 cm/yr between 500 and 150 cal. BP and increases again until reaching 0.05 cm/yr nowadays.



**Figure III.2** - Age-Depth Model for Bastani Lake sequence. Details for each date are presented in

*Tableau III-2.*

**Tableau III-2** -  $Pb^{210}$ ,  $^{14}C$  and pollen-inferred ages used for Age-Depth model of Bastani lake sequence.

ID	Depth (cm)	Lab code	$^{14}C$ yr BP	yr BP	Dated material
1	Top			-65	
2	Cs137 bomb			-13 ± 2	
3	210Pb			50 ± 5	
4	BAS13_P1-20	Poz-69623	325 ± 30		Terrestrial macro-remains
5	BAS13_P1-30	Poz-69624	545 ± 30		Terrestrial macro-remains
6	BAS13_P1-46	Poz-73333	1410 ± 30		Terrestrial macro-remains
7	BAS13_P1-55	Poz-69625	2110 ± 30		Terrestrial macro-remains
8	BAS15_P6-62	Poz-91245	1990 ± 30		Wood
9	BAS15_P6-75	Poz-91246	2875 ± 30		Wood
10	BAS13_P4-102	Poz-61153	3000 ± 35		Terrestrial macro-remains
11	BAS15_P6-92	Poz-109519	3660 ± 35		Terrestrial macro-remains
12	BAS15_P6-98	Poz-91247	3940 ± 40		Plant remains
13	BAS15_P6-113.5	Poz_909520	4430 ± 35		Terrestrial macro-remains
14	BAS15_P6-114	Poz-96090	4280 ± 120		Charcoal
15	BAS15_P6-128	Poz-91248	6130 ± 40		Plant remains
16	BAS15_P6-131	Poz-96091	6400 ± 50		Charcoal
17	BAS15_P6-148	Poz-91249	7960 ± 50		Plant remains
18	BAS15_P6-181 (Holocene Pollen data)			11650	

### 3.2. POLLEN, FUNGAL REMAINS AND CHARCOAL DYNAMICS

Eight global zones have been highlighted on the base of the Local Pollen Zones and Local Fungal remains Zones obtained with the CONISS cluster analysis and according to the CHAR signal (**Figure III.3** and **Tableau III-3**). Details for each proxy and zone are presented in supplementary materials (II and III).

**Zone 1 (12000 to 11500 cal. BP, i.e. the Palaeolithic period):** The beginning of the Holocene was characterised by a sharp decrease in the herbaceous taxa curve, rising from 40% to 20% of the Total Land Pollen Sum (TLPS), mainly represented by *Artemisia* and a concomitant rise of arboreal pollen. *Pinus* widely dominated the woody taxa (from 55% of the pollen at the beginning to 85% at the end of the period). Some trees and/or shrubs were also present: *Alnus* all over the period, *Juniperus* at the beginning and *Corylus* at the end of the period. The quantity and diversity of fungal

remains were low and *Sporormiella*-type was the only type represented all over the period. Charcoal influx values were very low without significant charcoal peak.

**Zone 2 (11500 to 7500 cal. BP, i.e. the Mesolithic period):** From 11500 to 9500 cal. BP (2a), *Pinus* was largely dominant. From 9500 cal. BP (2b), the relative proportion of trees and shrubs vs herbaceous did not change, but the percentages of *Pinus* dropped sharply to 40% of TLPS while the percentages of *Erica* increased very rapidly up to 40%. Other taxa remained stable. This period was also characterized by an increase in the charcoal signal and 18 significant charcoal peaks brought out, up to 1.5 #/cm<sup>2</sup>/yr and 5 000 μm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/yr. They accounted for 42% of the total number of peaks over the last 12 000 years. The most fire prone period (i.e. high concentration of charcoal peaks) occurred between 11 000 and 10 000 cal. BP. The W/L ratio of the charcoal particles stayed a bit higher than zero indicating compact charcoal particles. Similarly, the high A/P ratio was representative of geometric particles. Finally, charcoal particle size was broadly small (CHARnb curve is higher than CHARar curve), while fungal remains did not change.

**Zone 3 (7500 to 6500 cal. BP, i.e. the early Neolithic period):** Around 7500 cal. BP, *Erica*'s curve displayed a dramatic and sustained decrease from 40 to 10% of the TLPS. Conversely, *Pinus* rose again up to 60%. This period marked also a strong diversification of shrub species. Fungal remains assemblages were a slightly more diversified (Xylariaceae/Coniochaetaceae from 7500 cal. BP onward). In the same time, the charcoal content declined and peaks were rare.

**Zones 4 (6500 to 5000 cal. BP, i.e. the Mid to the Late Neolithic period):** From 6500 cal. BP, *Quercus ilex*-type and *Quercus pubescens*-type rose together, while evergreen *Quercus* pollen was the most important type influencing the variation of the global curve of *Quercus*. *Alnus* stabilized around 10% and its local presence has been highlighted thanks to pollen-clumps in the palynofacies, as for Poaceae that slightly increased as well. A slight but globally continuous increase in fungal remains was observed at the same period, especially the most dung related fungi. The usually wood-related types (Xylariaceae to *Helicoon*) were much more diversified and continuously present than before. Only one significant charcoal peak was recorded, and both CHARnb and CHARar decreased down to less than 0.5 #/cm<sup>2</sup>/yr and 5 000 μm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/yr, respectively.



**Zone 5 (5000 to 3500 cal. BP, i.e. from the Chalcolithic to the Bronze Age):** No significant changes were observed for pollen and fungal remains. Nevertheless, the CHAR<sub>nb</sub> and CHAR<sub>ar</sub> strongly increased with 9 significant peaks (21% of the total number of peaks), especially just before 4500 cal. BP when the highest charcoal peak of the entire sequence was found ( $> 2 \text{ \#/cm}^2/\text{yr}$  and  $20\,000 \text{ \mu m}^2/\text{cm}^2/\text{yr}$ ). The mean charcoal particle size increased (CHAR<sub>nb</sub> values were lower than CHAR<sub>ar</sub> values), the W/L ratio decreased a lot, indicating that the charcoal particles were more elongated, and the A/P ratio was low, suggesting indented shape.

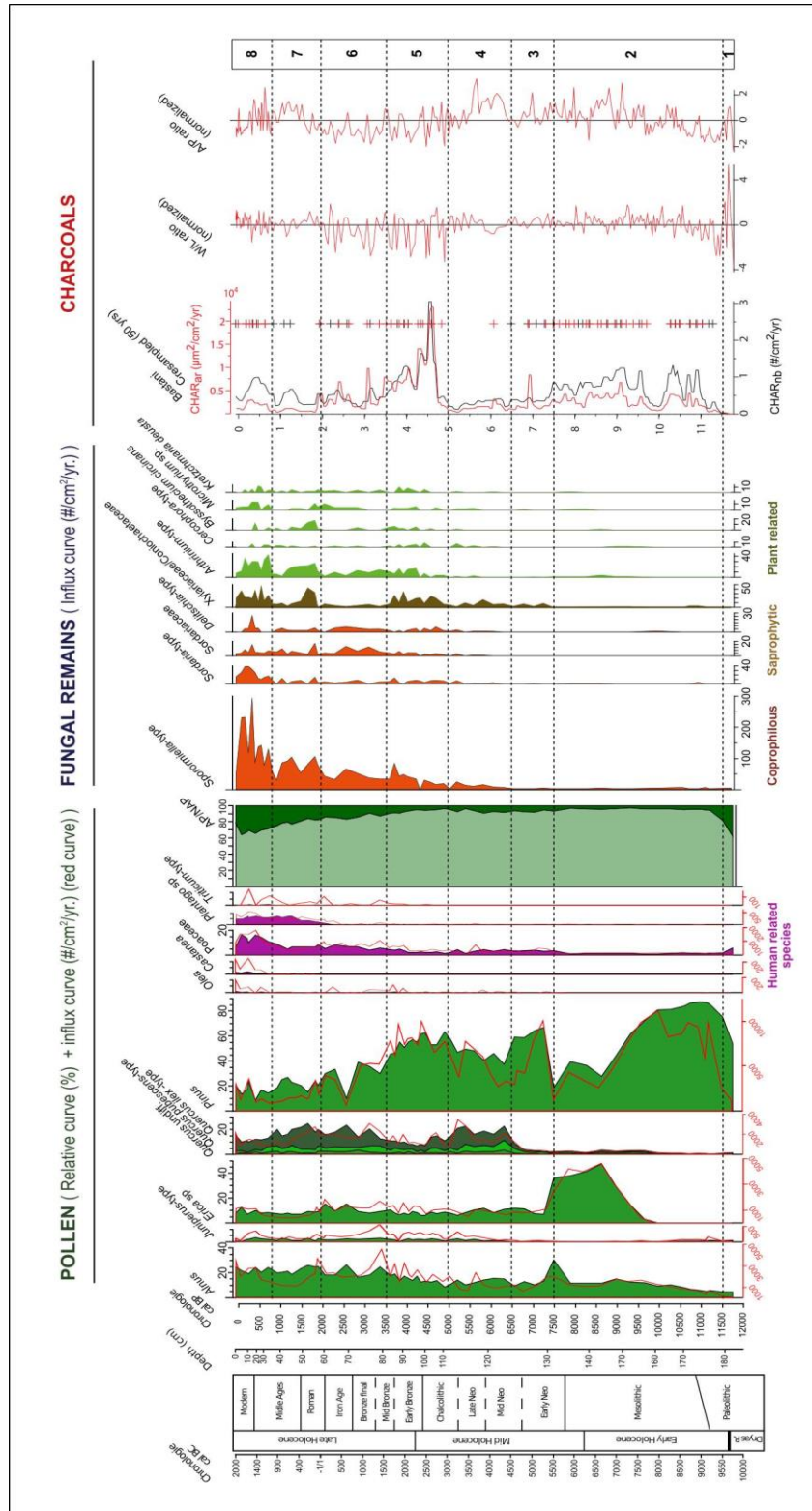
**Zones 6 (from 3500 to 1800 cal. BP, i.e. from the final Bronze Age to the Iron Age):** The decrease in *Pinus* abundance drove an overall decrease in trees and shrubs, despite a slight increase in both evergreen *Quercus*, and mountainous species (*Abies* and *Fagus*). The number of herbaceous taxa increased, especially Poaceae and human-related taxa such as crops (*Hordeum*-type, *Triticum*-type), and ruderals (*Plantago*-type, *Rumex*). The quantity of fungal remains significantly arose after 3500 cal. BP and *Sporormiella* sp. *Delitichia* sp., the Sordariales and *Arthrinium* sp. were well-represented taxa. The charcoal signal stayed high with 6 significant peaks.

**Zone 7 (from 1800 to 800 cal. BP, i.e. the Roman and Middle Age):** At this time, most of the trees and shrubs taxa maintained, except *Quercus ilex*-type, *Quercus pubescens*-type and *Pinus*, which decreased in favour of the herbs. The presence of the typical Mediterranean cultivated tree species (*Olea*, *Juglans* and *Castanea*) was more regular and their proportion more important. Between 1250 and 800 cal. BP a decrease in some of the main fungal remains types, especially *Sporormiella* sp. and *Arthrinium* sp. was part of a global decrease. The charcoal signal became very weak with only one significant charcoal peak at *ca.* 1400 cal. BP.

**Zone 8 (After 800 cal. BP, i.e. from the Middle Age to the Modern times):** No significant changes in the vegetation were observed, but the diversity and the quantity of fungal remains reached their maximum values during this last period, especially at its beginning. The best dung indicators types, namely *Sporormiella* sp. and *Sordaria* sp., were largely dominant. The charcoal signal also increased until reaching six significant peaks (more than  $1 \text{ \#/cm}^2/\text{yr}$  and  $2500 \text{ \mu m}^2/\text{cm}^2/\text{yr}$ ) at about 500 cal. BP, then it decreased rapidly until almost zero. This period encompassed a new decrease in the A/P ratio and an increase in the W/L ratio, indicating more compact and



geometric particles. In the same time, the mean particles size decreased and seemed to be smaller than the first period (the CHARar values were much lower while the CHARnb values are similar).



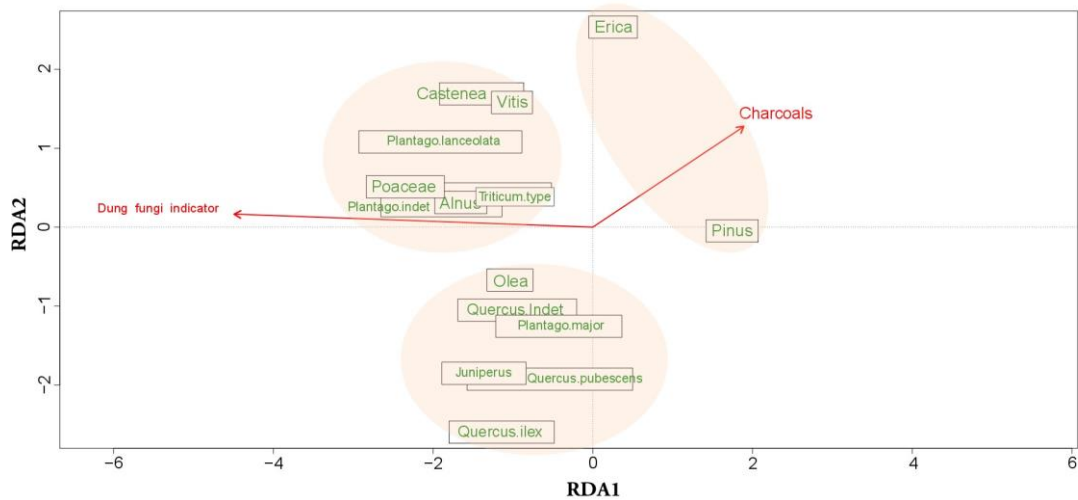
**Figure III.3** - Age scaled diagram of pollen percentages, fungal spores and charcoal influx with indication of the main zones of the evolution. Pollen are represented as relative curves (%). Fungal remains are represented as influx curves ( $\#/cm^2/yr$ ). Charcoal Accumulation Rate are presented both by the particle number (black curve;  $\#/cm^2/yr$ ), and the total particulate area (red curve;  $\mu m^2/cm^2/yr$ ). Crosses highlight fire episodes marked by significant peaks detected with Charanalysis statistical treatment (Higuera et al. 2009), the normalized Width / Length (W/L) ratio and the normalized Area / Perimeter (A/P) ratio of charcoal document change in particle shape.

**Tableau III-3** - Summary of the 8 mains periods of paleoecological changes occurring in the lake Bastani sequence. These ZONES have been highlighted on the base of Pollen Zones and Fungal remains Zones obtained with the CONISS cluster analysis and on the CHARnb and CHARar variations (**Figure III.3**). For detailed pollen and fungal remains diagram, see the supplementary material.

Main zones	Age cal. BP	Local Pollen Zone	Local Fungal remains Zone	Local Charcoals Zone
1	12000	1a Very low diversity. <i>Pinus</i> is dominant.	A Very low quantity and diversity. <i>Sporormiella</i>	Low CHARnb and CHARar. No significant charcoal peaks.
2	11500	1b <i>Pinus</i> is still dominant, diversity increase.	<i>sp.</i> is dominant.	Strong increase of CHARnb and CHARar. 18 significant charcoal peaks. Small, compact and geometric particles.
		2a <i>Erica</i> increase while <i>Pinus</i> decrease.		
3	7500	2b <i>Erica</i> decrease, <i>Pinus</i> increase. Shrubs are diversifying.	B As previous zone, but diversity is increasing	Decrease of CHARnb and CHARar. Only 1 charcoal peaks.
4	6500	2b' Development of <i>Quercus ilex</i> -type. Poaceae increase.	C Strong increase of all taxa, including dung related fungi and wood related taxa. Small decrease between 1250 and 800 cal. BP.	Strong increase of CHARnb and CHARar.
5	5000			
6	3500	3a Decrease of <i>Pinus</i> and other trees. Increase of herbaceous and human related taxa.		15 significant charcoal peaks. Big, elongated and indented particles.
7	1800	3b Decrease of trees and increase of herbs.		Decrease of CHARnb and CHARar. One significant charcoal peak.
8	800	4 Presence of typical Mediterranean cultivated species.	D Strong increase of the quantity and diversity of all taxa.	Increase of CHARnb and CHARar. 6 significant charcoal peaks. Very small, compact and geometric particles.

### 3.3. VEGETATION AND BIODIVERSITY DYNAMICS

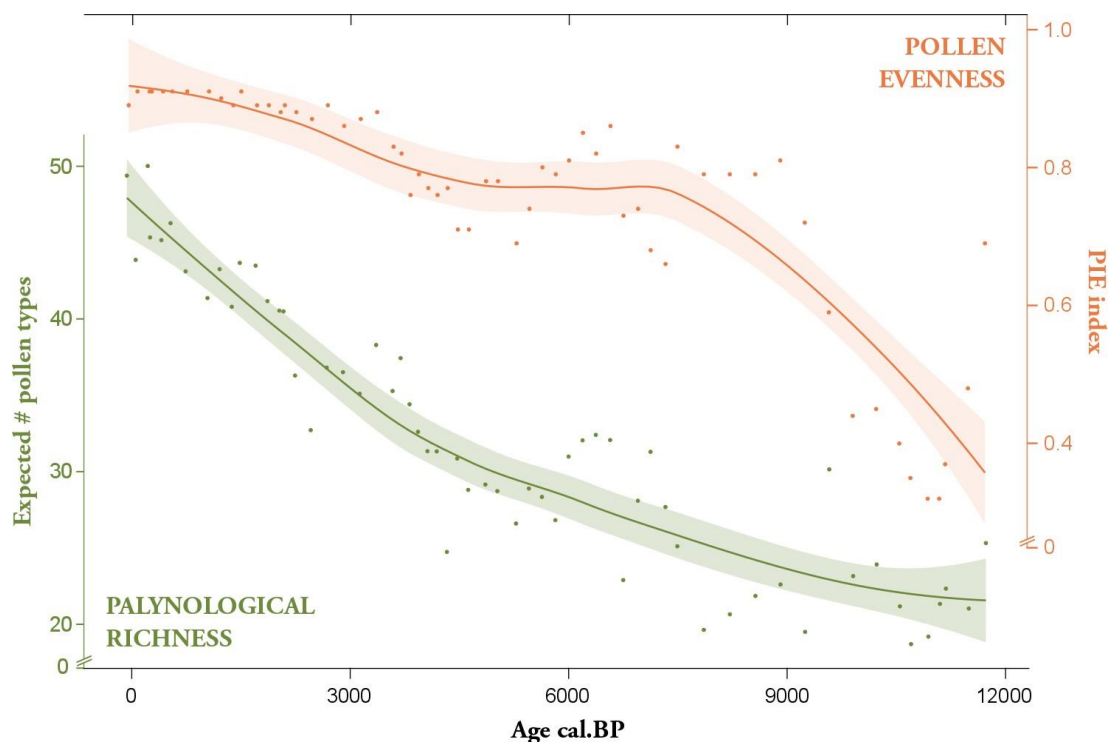
RDA with charcoal influx suggests that fire explains 10.5% of the vegetation dataset variance (**Figure III.4**). *Erica* and *Pinus* taxa are positively correlated to charcoal influx, whereas *Olea*, *Quercus*, *Plantago major/media* and *Juniperus* are negatively correlated. Spores of dung fungus *Sporormiella*-type explains 26.5% of the vegetation data variance and are positively correlated with *Castanea*, *Vitis*, *Plantago lanceolata*, *Alnus*, *Triticum*-type and *Poaceae* pollen taxa.



**Figure III.4** - RDA biplot of selected species and two explanatory variables: charcoal influx and spores of the dung fungus *Sporormiella* influx are used as proxies for fire (which influences 10.5% of data variance) and presence of grazing mammals (which influences 26.5% of data variance). *Castanea*, *Alnus*, *Triticum* and *Poaceae*, compose the first group. *Erica* and *Pinus* compose the second group, and *Plantago*, *Juniperus*, *Quercus pubescens*-type and *Quercus ilex*-type compose the last group.

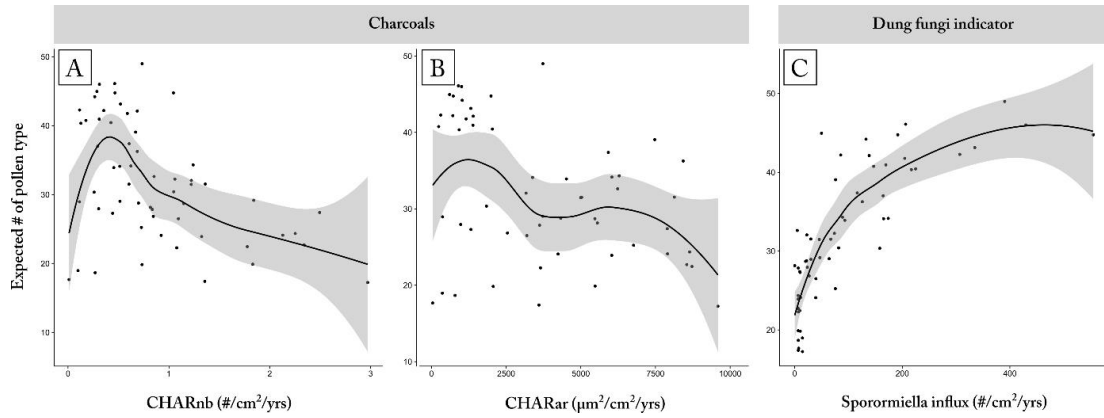
Palynological richness has increased over time since the beginning of the Holocene (**Figure III.5**). The expected number of pollen types has increased from 20 (c. 11000 cal. BP) to 50 nowadays. This increase was more marked starting from c. 3500 cal. BP onwards, at the same time as the increase in cultivated species (*Plantago*, *Olea europea* etc.) and *Poaceae* and the increase in *Sporormiella*-type (shift from Zone 5 to Zone 6). Pollen evenness showed the same increasing trend as palynological richness during all the Holocene. The increase was more marked before 7500 cal. BP, and then remained relatively constant until c. 3500 cal. BP, before a new increase, up to

nowadays values. Palynological richness and pollen evenness showed positive correlation ( $\rho=0.72$ ,  $p\text{-value}<0.001$ ).



**Figure III.5** - Comparison between palynological richness estimated on a constant sum of 693 pollen grains. Spearman's rank correlation between richness and evenness:  $\rho = 0.73$  //  $p\text{-value} > 0.001$ .

The palynological richness has been also plotted as a function of CHAR<sub>nb</sub> and CHAR<sub>ar</sub> and Sporormiella-type Influx to highlight potential correlations (**Figure III.6**). We could not highlight significant correlation between palynological richness and CHAR, but we observed a maximum of richness for an intermediate value of CHAR around 0.5 #/cm<sup>2</sup>/yr (number) and 1500 μm<sup>2</sup>/cm<sup>2</sup>/yr (total area). Lower or higher CHAR values were related to lower richness. The Sporormiella-type influx ranged between 0 and 555 #/cm<sup>2</sup>/yr (mean was 96.81) and it was significantly positively correlated with palynological richness ( $\rho=0.74$ ,  $p\text{-value}<0.01$ ). Detailed results are available on supplementary materials (IV, V, VI).



**Figure III.6** - Palynological richness in function of CHAR and *Sporormiella* influx.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. DYNAMICS OF CORSICAN LANDSCAPE DURING THE HOLOCENE

The early Holocene was characterized by the recolonization of the woody vegetation (Reille, 1992a; Reille et al., 1999). At this time, our results, recording many CHAR peaks (**Figure III.3**), suggests a sustained fire regime. The dry climatic conditions during the summer (Drescher-Schneider et al., 2007; Finsinger et al., 2010; Rossignol-Strick and Paterne, 1999; Vannière et al., 2011) adding to the increase in the fuel availability (Reille et al., 1997, 1999) could have favoured fire ignition and propagation during the early Holocene. This trend has been observed in several Mediterranean sites (e.g. Vannière et al., 2008; Wick et al., 2003) including the Corsican Creno lake (Leys et al., 2014). At this time, open to closed forest dominated by *Pinus sp.* explain a relatively low forest diversity and evenness, in particular for trees species (see appendix IV A). A too strong increase of in fire frequency or severity prevented the development of a diversified landscape, as suggested in our results (**Figure III.4**) and supported by the literature (Aranbarri et al., 2014; Ladd P. G. et al., 2004).

Between 9500 and 7500 cal. BP, we observed a strong expansion of *Erica*, previously observed by Reille et al. (1999). Here, we assume that *Erica* pollen originate from *Erica arborea* regarding that this species is the main type of Ericaceae growing in the

hinterland of Corsica (Gamisans, 1999). Nowadays, *Erica arborea* is associated with other tree species such as *Arbutus unedo* or *Pinus nigra* (Leys et al., 2014; Reille et al., 1999). Moreover, these shrublands are generally considered as early successional communities (Beffa et al., 2016), and as fire-prone systems (Curt et al., 2011a) well adapted thanks to high resprouting capacities (Lloret et al., 2004; Lloret and López-Soria, 1993). These observations suggest that the vegetation was composed with a dense heather stratum. This period should correspond to a thermal optimum when *Erica arborea* may have reached higher elevation than pines. Models proposed by Pausas (1999, 2006) show that under too high fire frequency, *Pinus sp.* decreases whereas *Erica arborea* increases, suggesting a change in structure from forest to shrublands with fire frequency increase. Moreover, the vital attribute model proposed by Noble and Slatyer (1980) underline that one of the most important vital attribute correspond to ability to establish and grow to maturity in the community. Because fires were more frequent at this time, Pine probably did not have enough time to mature and produce seeds. From this point, and according to Beffa et al. (2016), we suggest that this mixed Pine / heather forest corresponded to a transition state from a forest to a more open environment composed of heather. This dominance of *Erica* shrublands under high fire frequency was probably related to warmer/drier climate conditions than today.

A major event, already observed from sediments of lake Creno (Reille et al., 1999), occurred around 7500 cal. BP, with the decrease of *Pinus*. For Reille et al. (1999), these changes are attributed to human activities. Moreover, during that period we are witnessing the increase in Poaceae, which supports the human impact hypothesis. Comparing our result with previous studies (Colombaroli et al., 2009; Leys et al., 2014; Reille et al., 1999), we suggest that the wetter climate characterized by low fire frequency and potential increase in the moisture availability (Drescher-Schneider et al., 2007; Vannière et al., 2008), adding to the decrease in fuel due to human activities (deforestation and pasture) (San Roman Sanz et al., 2013b) also observed in Tuscany (Colombaroli et al., 2009; Finsinger et al., 2010), have favoured the evergreen *Quercus* establishment in Corsica. However, the relative part of both drivers (climate and human activities) is difficult to estimate and needs further study. The long fire-free period after this major event helped *Quercus ilex*-type and *Quercus pubescens*-type, which are late successional species, to colonize because they are better competitors



than *Pinus* (pioneer species) in an undisturbed environment (Carcaillet et al., 1997; Colombaroli et al., 2009; Reille, 1992a). This marked expansion of *Quercus* was associated with a vegetation richness increase around 6500 cal. BP, as contemporaneously observed from Creno lake (Reille et al., 1999) and regionally earlier observed (8000-9000 cal. BP) in central Italia (Colombaroli et al., 2007, 2008; Finsinger et al., 2010).

During the period that followed the development of these mixed oakwood forests, the analysis of pollen and dung fungal remains pinpointed the correlation between vegetation changes and human history. *Sporormiella*-type was recorded during the entire Bastani lake sequence, probably corresponding to wild fauna, but a significant increase superimposed to the appearance of other dung fungal remains (e.g. Sordariales, *Delitshia sp.*) indicates the presence of large herbivores around the lake, at least since 5000 cal. BP. The frequentation of the lake area by livestock seems to be a plausible explanation of this dung fungal spore increase. Moreover, this hypothesis of human presence was followed by an increase in charcoal content, which could be explained by the land use transformation from forest into crops and pastures through deforestation and use of fire (Janny and Costa, 2004). Indeed, the use of fire in European Neolithic cultures for land-use and clearance is widely attested (Carcaillet, 1998; Clark et al., 1989; Mouillot et al., 2008; Tinner et al., 2005; Vannière et al., 2008; Vannière and Martineau, 2005).

Such increase in biomass burning changed the tree composition by reducing oaks and promoting pines. This forest opening during the late Holocene has also been observed in Sardinia (e.g. Beffa et al., 2016), Iberia (e.g. Pausas, 2004) and southern France, including Corsica from the palynological reconstruction from Creno lake (e.g. Reille et al., 1999). Moreover, our results show a clear increase in anthropogenic activities indicators such as ruderal pollen types (e.g. *Plantago*-type) and a clear increase in pasture indicators such as *Sporormiella*-type suggesting that agricultural and pastoral activities were increasingly practiced in the area. In agreement with other studies (e.g. Beffa et al., 2016; Colombaroli and Tinner, 2013; Vannière et al., 2008), and even though our results can't totally rule out the role of climate, we mainly attribute this opening (increase in NAP and cultural indicators) to the increase in human activities (Ghilardi et al., 2017; Morelli and Francalacci, 2000b).



After 1800 cal. BP, the decrease in charcoal-inferred fire signal combined with the increase in the proportion of dung fungal spores and crop pollen suggest that human practices have changed and that the population better controlled fire. It is concomitant with the end of the Roman Empire, which induced a decrease in the human population at the island scale during the medieval period (Caratini, 1995; Morelli and Francalacci, 2000b). Finally, since 800 cal. BP, human impact has been more and more visible particularly by the increase in dung fungal spores and by cultivated species (*Triticum*-type, *Olea*, *Castanea*). This increase could be explained by the strong Tuscan immigration into Corsica observed after 800 cal. BP (Morelli and Francalacci, 2000b). These human activities, in particular crops and pasture, affected all ecosystems, from the Alpine belt with pastoralism to the Mediterranean sea level with olive groves. They have opened more and more the landscape up to the current Corsican landscape. This period of demographic increase (Morelli and Francalacci, 2000b) contributed to increase fire occurrences over the last centuries. Moreover, over the last few decades, a decline of pastoral activities and a land abandonment have been observed, causing a closure of the environment (Mouillot et al., 2005; San Roman Sanz et al., 2013b). This closure combined with the global warming (in particular the increase in summer temperature) could promote future uncontrolled fires (Giannakopoulos et al., 2005; Moriondo et al., 2006; Mouillot et al., 2002, 2003).

#### 4.2. FUEL AND FIRE TYPE CHANGES: FROM PINWOOD CROWN FIRE TO SLASH-AND-BURN PRACTICES

The present study participates to the charcoal classification by using the W/L ratio and a new method to compare the regularity of charcoal particle contours by calculating the A/P ratio. These methods have the great advantage of being independent of each other. As it is an automated measure, these indices accuracies are not related to the observer and are reusable for any other samples. Finally, the use of both CHAR<sub>nb</sub> and CHAR<sub>ar</sub> to estimate the change in the particle size is a kind of sensitivity analysis that reinforces our findings.

Our results highlighted that each of the three main fire-prone periods was associated with different charcoal morphologies. During the first period (11 500 to 6500 cal. BP),

the mean particle size was small, geometric and not much elongated but particles were numerous, which corresponds to what we described as the homogenous pinewood period characterised by frequent fire episodes. As explained previously, the shape of our charcoals could be explained by many ways: first, charcoals could have undergone many reshuffle (e.g. Vannièrè et al., 2003; Ali et al., 2009), secondly, the signal captured may come from long distance (e.g. Clark and Royall, 1995), and lastly, the fuel was more woody than herbaceous (e.g. Umbanhowar and Mcgrath, 1998). Because this period of intense biomass burning at the early Holocene has been observed in every Corsican studies well-dated (e.g. Carcaillet et al., 1997; Leys et al., 2014), we can logically say that this signal corresponds to a global trend for Corsica. Moreover, pinewoods in the Mediterranean basin tend to engender crown fires (Pausas et al., 2009a), so, the typical shape of our charcoals can also reflect a majority of woody fuels.

The second period (5000 to 1800 cal. BP) was characterised by large, elongated and indented particles. We described this period as driven by human activities like slash-and-burn practices. According to previous studies (Enache and Cumming, 2007; Jensen et al., 2007; Mustaphi and Pisaric, 2014; Umbanhowar and Mcgrath, 1998), and to other Corsican studies (Carcaillet et al., 1997; Leys, 2012; Leys et al., 2014; Reille, 1992a; Reille et al., 1999), our results could reflect a more herbaceous fuel and local signal induced by the development of human activities (e.g. maintenance of open landscapes). Because increased charcoal influx may be associated with higher fuel consumption (one aspect of fire severity) (Dunnette et al., 2014; Feurdean et al., 2017; Higuera et al., 2011), the higher charcoal peaks magnitude at this period could also indicate higher fire severity and/or larger burned area (Duffin et al., 2008; Feurdean et al., 2017; Higuera et al., 2009).

During the third period covering the last centuries, the pollen grains have been smaller than ever and the charcoals particles have been more geometric and less elongated. We described this period by an opening of the landscape and an increase in the fire signal, in majority due to human activities. This observation reflects a global trend, for Corsica (Leys et al., 2014) and worldwide (Blarquez et al., 2015; D. Syphard et al., 2007; Li et al., 2017; Vannièrè et al., 2016). This shift at 800 cal. BP with small and compact charcoals was also highlighted in Italy (Iago dell'Accesa. Vannièrè et al., 2008). The authors associated that as a result of erosional processes highlighted by

changes in the accumulation rate since 1800 years, which are linked with agricultural activities that implemented another use of fire than before (Bajard et al., 2017; Giguet-Covex et al., 2014). Our pollen and fungal remain results suggest that most parts of the area were open and used as crop fields or pastures. Based on the Bastani lake watershed particularities (small size, no-steep slope, and high elevation), erosion was likely very limited and observed terrigenous inputs were more probably due to African dusts. We have not enough results to discuss dust contribution to sedimentation in details in the present study, but a more complete study on Bastani erosion will be soon available (P. Sabatier, personal communication). From these observations, it seems that human activities could have contributed to increase fire frequencies, and the changes in charcoals morphotypes probably correspond to a change in the kind of fire and fuel.

#### 4.3. DID FIRE AND HUMAN ACTIVITIES CONTROL OR AFFECT BIODIVERSITY?

The representativeness of the vegetation diversity by pollen is controversial (Goring et al., 2013; Odgaard, 2006). However, it is actually the only way to have an idea of the past vegetation diversity. Moreover, in their review, Birks et al. (2016) show that pollen richness is a good indicator for vegetation richness. So, while it is a valuable measure of long-term biodiversity changes (e.g. Colombaroli and Tinner, 2013), these results must be interpreted carefully (Felde et al., 2016; Meltsov et al., 2011; Odgaard, 2001; Weng et al., 2006). Because palynological richness and pollen evenness are largely positively correlated, we assume that pollen evenness has an effect on palynological richness (Beffa et al., 2016; Colombaroli and Tinner, 2013).

In their review, Pausas and Ribeiro (2017) highlight that fire can drive plant diversity by various ways. Fire regime can drive population divergence and diversification (Bytebier et al., 2011; Pausas, 2015) and it can generate landscape mosaics and thus more habitat types and more niches likely to be filled by different species (Bird et al., 2008; Bond and Keeley, 2005; Cohn et al., 2015; Leys et al., 2018b). In this sense, fire would increase vegetation evenness by generating the biotic heterogeneity that drives diversity (Stein et al., 2014). This positive impact of fire on vegetation is observed

when both the CHAR and the palynological richness increased simultaneously (**Figure III.6**). Nevertheless, beyond a certain value (i.e. visually around  $0.5\#/cm^2/yr.$ ), fire frequency induced a strong decrease in the palynological richness. Such observation is in line with the intermediate-disturbance hypothesis (Fox, 1979), suggesting that when the disturbance (here fire) is almost absent (here low CHAR), the interspecific competition increases and several species disappear. Conversely, when the disturbance is too strong (here high CHAR), species are not adapted anymore and the post fire recovery only allows few species (the most adapted). Similar trends for the long-term millennial scale have been observed by Colombaroli and Tinner (2013).

Previously, we discuss the role of human in the setting up of the current Corsican vegetation. In addition, our results highlighted that the increase in pasture (detected by dung fungi indicator) promoted high plant diversity (**Figure III.6**). These results agree with another recent study from the Mediterranean region (Portugal. Listopad et al., 2018). They showed that a grazing exclusion shorter than 5 years promotes a high diversity of herbs and shrubs, whereas a longer period will promote a higher diversity and height of trees, which in turn, will allow them to be protected from further grazing (i.e. bush encroachment effect). Currently, the high Corsican plant diversity is mainly composed by shrubs and herbs forming a landscape of maquis (e.g. Mouillot et al., 2005; Saitta et al., 2018). According to our observations and to other studies (Correia, 1993; Saïd, 2002; Sedlar et al., 2018), and even though our results did not permit to totally exclude the climate as a significant driver, we suggest that this currently high diversified Corsican landscape is mainly due to millennia of traditional management practices, in particular pasture. However, the abandonment of these traditional human activities observed since few decades (Mouillot et al., 2005), adding to the increase in invasive species due to international exchanges (Traveset et al., 2008), could probably i) promote future forest rather than maquis expansion, ii) induce a loss of biodiversity (Médail and Verlaque, 1997; Saïd, 2002), and iii) increase the fuel availability. Combined with the dryer climate predicted for the next decades due to global warming (Giannakopoulos et al., 2009; Sheffield and Wood, 2008a), we can expect a strong increase in fire frequency and intensity for the next decades, likely similar to those from the early Holocene, despite of the fire suppression efforts (Lahaye et al., 2014).

This fire prone climate adding to the fuel increase threatens the important Corsican plant diversity.

## 5. CONCLUSION

A high-resolution analysis of charcoal, pollen and fungal remains in lacustrine sediments from the lake Bastani permitted to reconstruct precisely fire history, land cover changes, and land use dynamics of a representative region of Corsica and the Mediterranean basin. Since 11000 cal. BP, vegetation has been dense and dominated by *Pinus* with a low diversity, in particular for trees species. The dry summer conditions have induced intensive and frequent fires. The numerous occurrences of fire during millennia contributed to open the environment with the development of *Erica* heather until 7500 cal. BP. Then, the decrease in fire events induced a closure of the forest by the colonization of mixed oak forests. From 5000 cal. BP, humans seem to have been the main driver of vegetation dynamics and fire occurrences by deforesting and developing crops, and pastures, using fire. These changes are supported by changes in the charcoal morphotypes, and agree with many Mediterranean studies, attesting again the potential of the Bastani lake to reflect global changes for the Mediterranean region. Thereby, it is placed in the lineage of other high-elevation Corsican lakes (e.g. lake Creno, Reille et al., 1999), which reflect at least the whole island history. Moreover, we have observed many similarities with other Mediterranean sites (e.g. the early Holocene characterized by many fires, first human impacts on fires around 7500 cal. BP that promoted the expansion of *Quercus ilex...*), in particular in Sardinia (Beffa et al., 2016; Morelli and Francalacci, 2000b) and Tuscany (Colombaroli et al., 2008; Finsinger et al., 2010; Vannière et al., 2008). This illustrates a global trend that probably occurred on the entire northern part of the Mediterranean basin.

Based on the present palaeoecological record, we suggest that the climate and natural fires were the main factors shaping the landscape before 5000 cal. BP. However, the extraordinary diversity of herbs, shrubs and trees in the current Corsican landscape is mainly due to human practices, in particular since the Bronze Age (3500 cal. BP), as they promoted ecosystem diversity and niche availability (e.g. Colombaroli et al.,

2008; Connor et al., 2019). We currently assist to a decrease in pastoral activities and the land abandonment associated with (Correia, 1993; Mouillot et al., 2005; San Roman Sanz et al., 2013b), which increases fuel availability. Moreover, the increase in human density could increase the fire hazard (Lahaye et al., 2014, 2018a). Adding to the global warming and the dryer climate associated to, the next decades should be characterized by an increase in fire frequency and intensity. These changes could affect the plants diversity of Corsica, such as predicted for European forest, from temperate to southern Mediterranean region (Pausas et al., 2009a; Pausas and Ribeiro, 2017; Rundel et al., 2013).

One next step would be to model these past fire regimes and past vegetation in order to gain control of the underlying mechanisms. For this reason, we have to work on ecosystem management based on vegetation and fire relationships. To do so, we urgently need to continue investigation on the vegetation biodiversity dynamics associated with fire and human activity dynamics in this region in order to avoid human and economic damages and irrecoverable biodiversity losses within a near future.

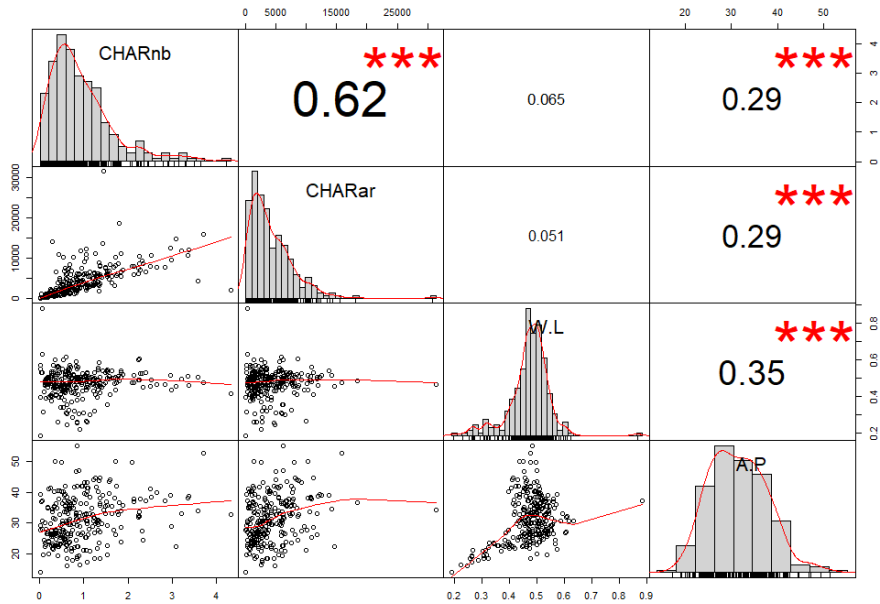
## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This study was founded by Région Bourgogne Franche-Comté through Chrono-environnement laboratory, the MSHE Ledoux and the projects ONOMAD, QMedFire and ENVILEG led by BV. This study was also supported by the CNRS PaléoMEx-MISTRALS program. This study is part of the PAGES-GPWG activities. Finally, we thank the Environnemental Office of Corsica, the town of Ghisoni and the National Forest Office for the lake access permit. We thank also Walter Finsinger for his help during coring fieldwork.

## ANNEXES

### Appendix A

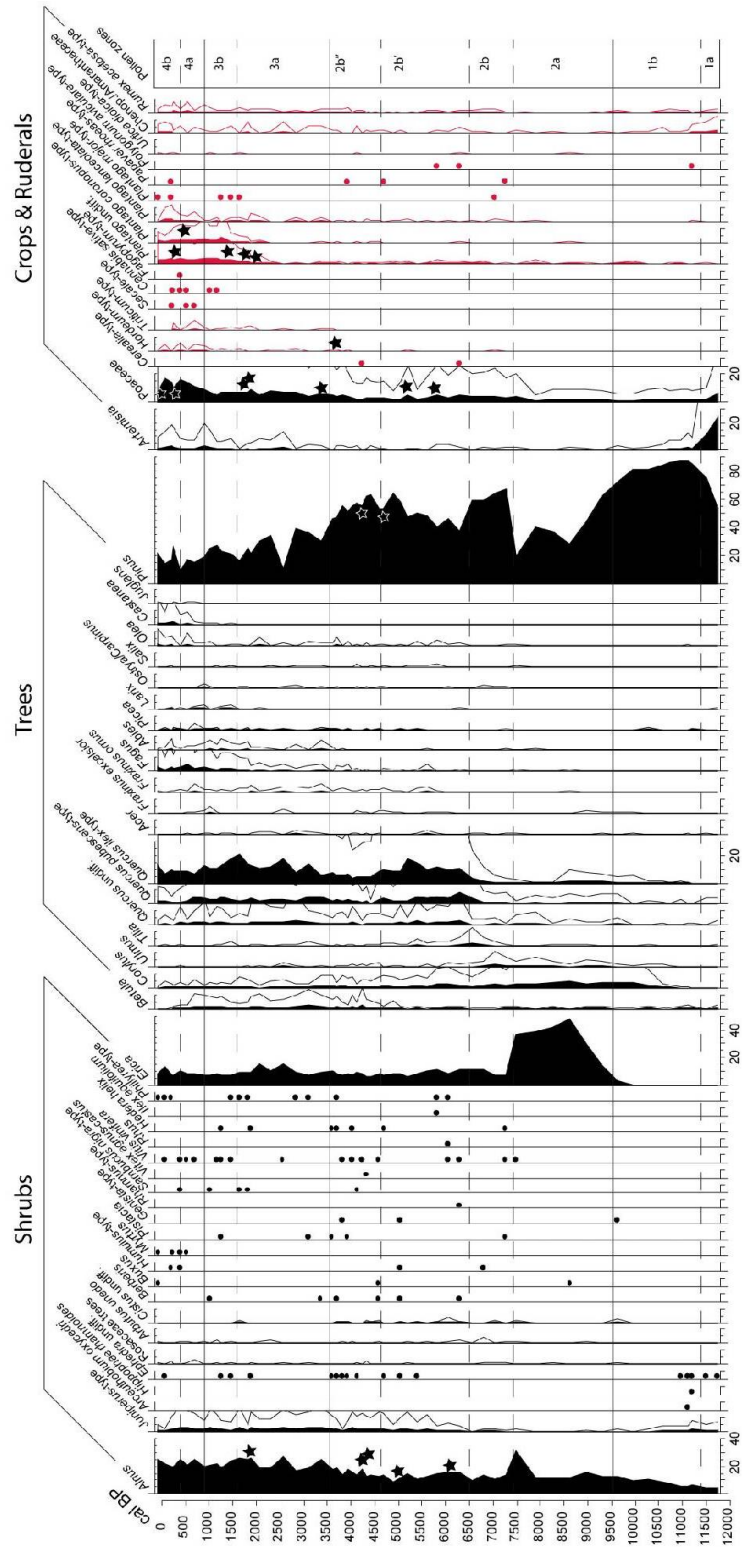
Correlation matrix between CHARnb, CHARar, W/L ratio and A/P ratio using Spearman correlation. The distribution of variable variables on the diagonal. At the bottom of the diagonal: The scatter plots are shown with the trend line.



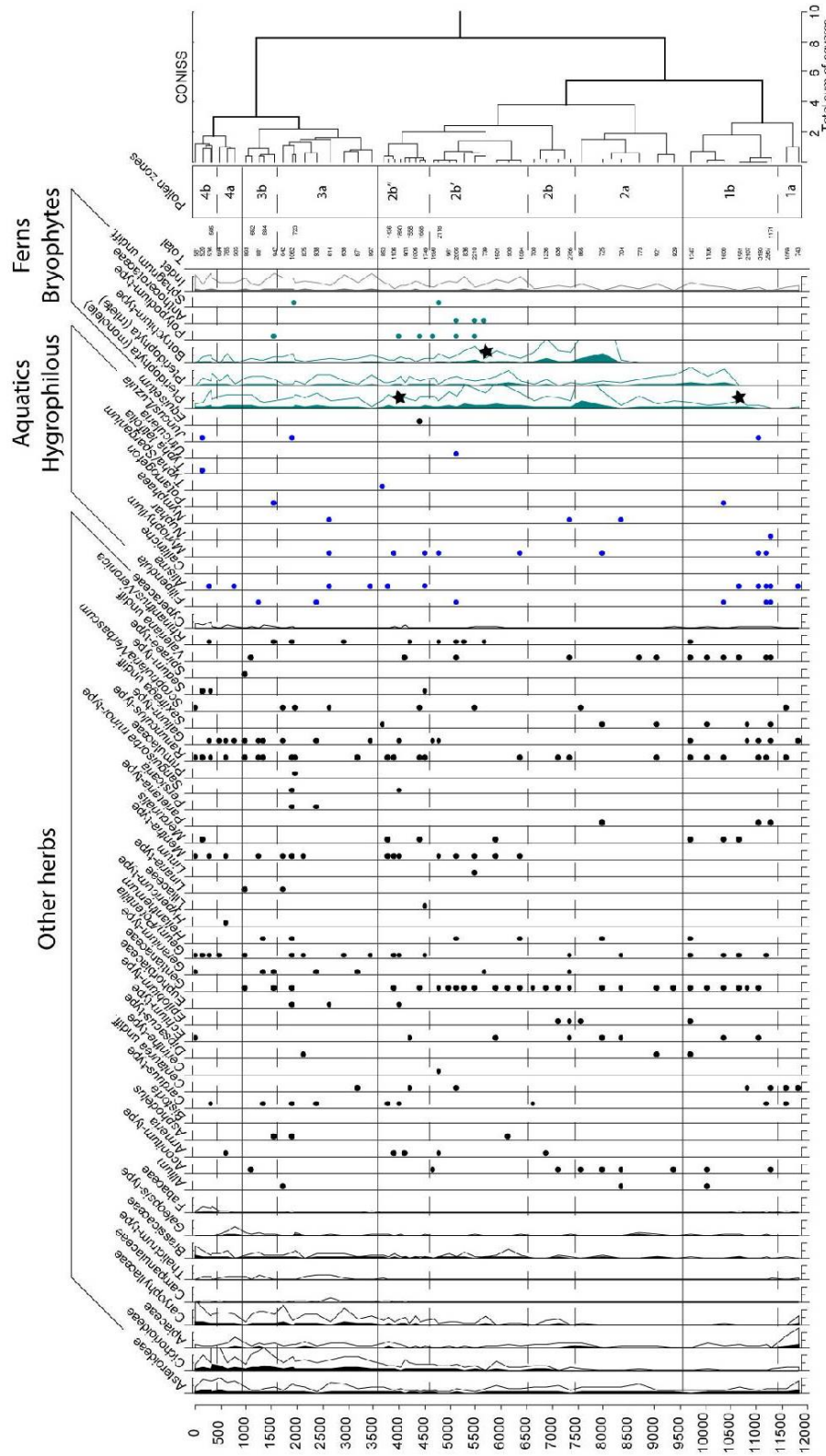


**Appendix B**

Pollen diagram detailed for BAS15.



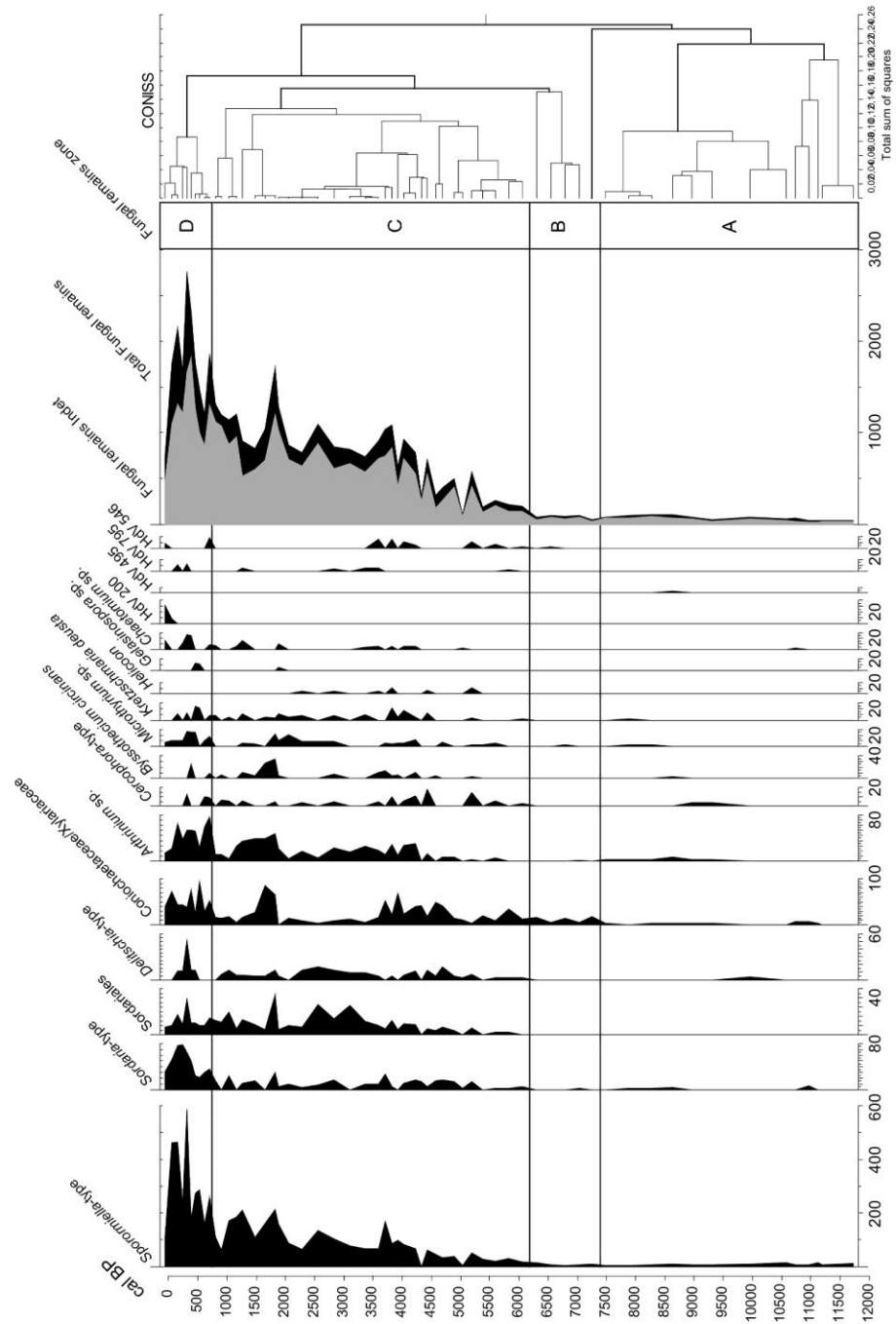




★ Clumps of pollen grains or spores

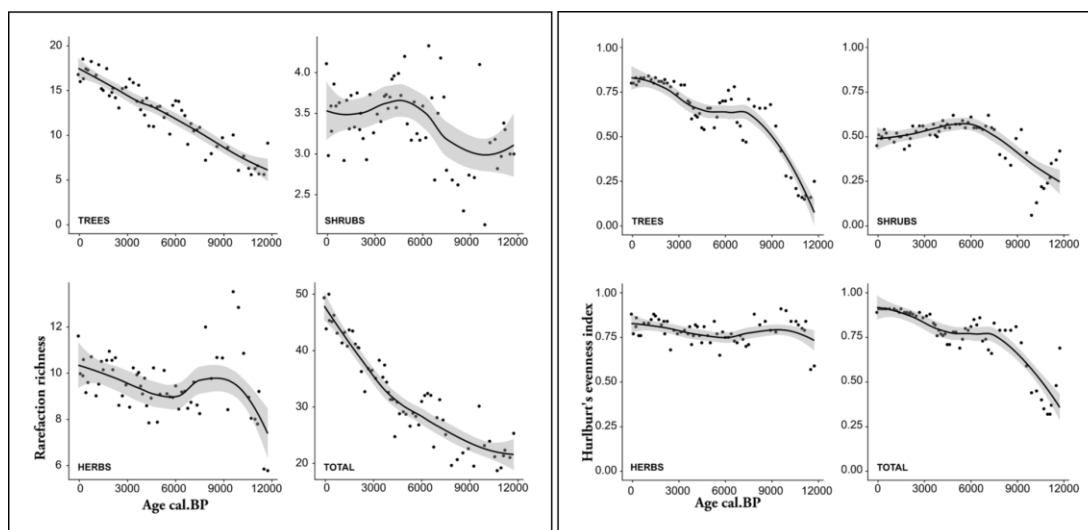
**Appendix C**

Fungal Remains diagram detailed for BAS15. They have been displayed, from left to right, from the most probably related to dung to the most probably plant parasites (according to literature in palaeoecology (e.g. Baker et al., 2013; Van Geel, 2002; Van Geel and Aptroot, 2006) and present day ecology (e.g. Ellis and Ellis, 1985)).



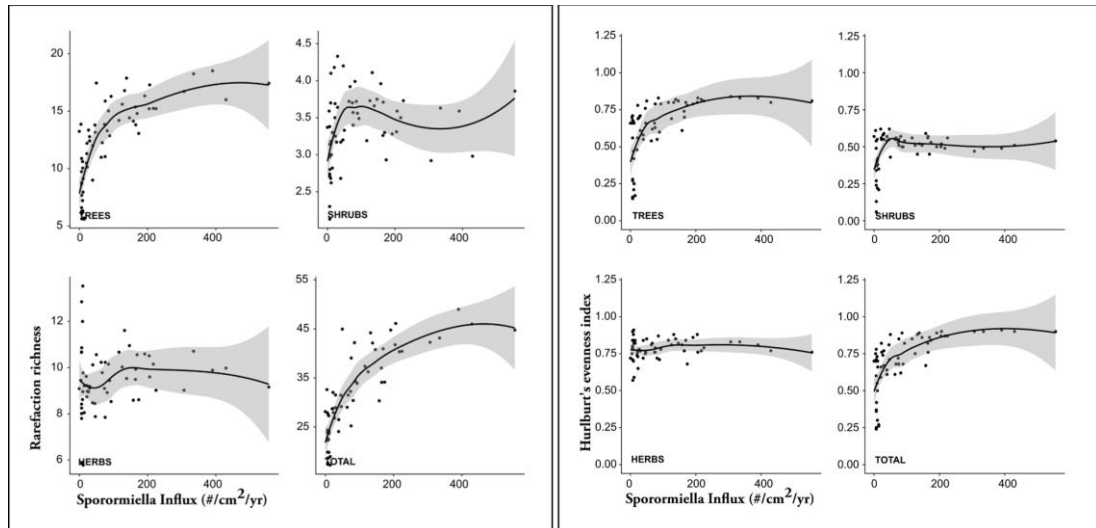
### Appendix D

Palynological richness (A), and evenness (B) over time estimated on a constant sum of 693 pollen grains.



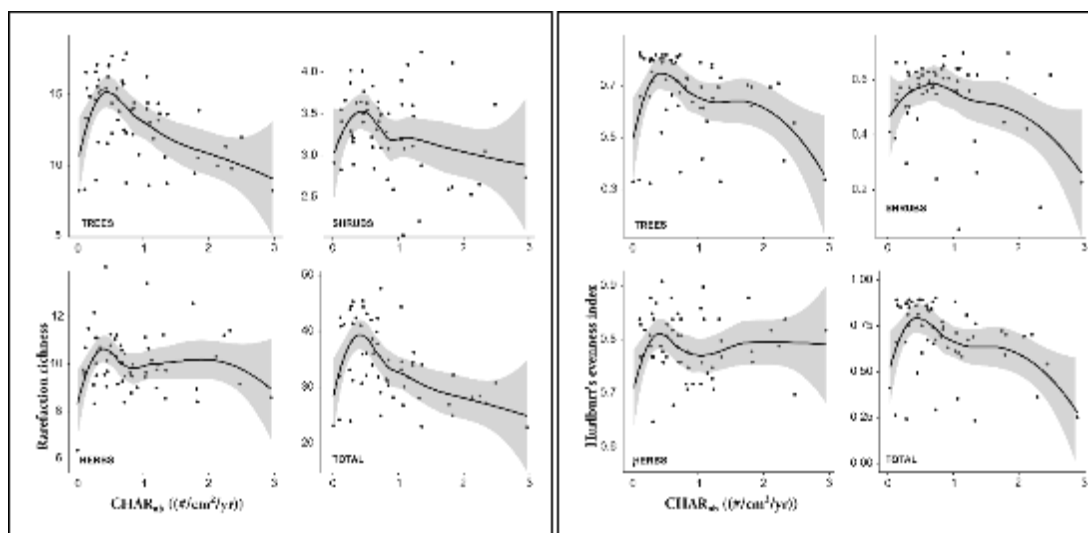
### Appendix E

Palynological richness (A), and evenness (B) in function of Sporormiella influx estimated on a constant sum of 693 pollen grains. Results of Spearman's ranks correlation for A) Richness :  $Rho=0.81^{**}$  (trees);  $Rho=0.36^{**}$  (shrubs);  $Rho=0.21$  (herbs);  $Rho=0.83^{**}$  (total). B) Evenness :  $Rho=0.71^{**}$  (trees);  $Rho=0.16^{**}$  (shrubs);  $Rho=0.11$  (herbs);  $Rho=0.74^{**}$  (total). (\*p-value<0.05; \*\*p-value<0.01).



**Appendix F**

Palynological richness (A), and evenness (B) in function of Charcoal Accumulation Rate (CHAR<sub>nb</sub>) estimated on a constant sum of 693 pollen grains. Results of Spearman's ranks correlation for **A) Richness** : Rho=-0.03 (trees); Rho=0.26\* (shrubs); Rho=0.21 (herbs); Rho=-0.04 (total). **B) Evenness** : Rho=-0.11 (trees); Rho=0.55\*\* (shrubs); Rho=-0.29\* (herbs); Rho=-0.12 (total). (\*p-value<0.05; \*\*p-value<0.01).







---

---

## Chapitre IV.

### LA COMBINAISON DU MDC ET DES DONNEES PALEOECOLOGIQUES POUR COMPRENDRE L'IMPACT DU CLIMAT SUR LES REGIMES DE FEUX MEDITERRANEENS AU COURS DE L'HOLOCENE

---

---

**Combining the Monthly Drought Code and Paleoecological data to assess the  
Holocene climate impact on Mediterranean fire regimes.**

**Marion Lestienne<sup>1,2</sup>; Christelle Hély<sup>2,3</sup>; Thomas Curt<sup>4</sup>; Isabelle Jouffroy-Bapicot<sup>1</sup>;  
Boris Vannièr<sup>1,5</sup>**

<sup>1</sup>Chrono-environnement, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

<sup>2</sup>ISEM, Université Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France

<sup>3</sup>EPHE, PSL University, Paris, France

<sup>4</sup>IRSTEA, Mediterranean ecosystems and risks, Aix-en-Provence, France

<sup>5</sup>MSHE Ledoux, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France



*Fire*



## RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Actuellement, les indices issus du système Canadien « Fire Weather Index » ou « FWI » sont utilisés pour prédire la probabilité journalière d'occurrence des feux en fonction des conditions météorologiques. Toutefois, il n'existe pas d'indice utilisable à la fois pour le présent et pour les conditions climatiques passées, et cela pour le Bassin Méditerranéen. Dans ce contexte, nous testons ici l'efficacité de l'indice de sécheresse « Drought Code » ou « DC » et son dérivé l'indice mensuel de sécheresse « Monthly Drought Code » ou « MDC » en comparant nos calculs pour l'Holocène aux reconstitutions des régimes de feu, des dynamiques de végétation et des activités humaines passées obtenues grâce aux archives sédimentaires lacustres.

Dans la première partie de l'étude, nous avons testé l'efficacité du MDC pour détecter les mois avec feux. Nos résultats montrent que le DC était capable de détecter les jours avec feux sur la période 1979 – 2016, la valeur seuil se situant autour de 400 unités. De plus, les valeurs de DC combinées à ce seuil nous ont permis de calculer la longueur de saison de feux. Nous avons ensuite comparé le DC et le MDC et nos calculs montrent leur très forte corrélation qui est plus forte encore que celle trouvée en zone boréale pour laquelle ces indices ont été développés. Enfin, la longueur de la saison de feux calculée *via* le MDC (111 jours) est très proche de celle calculée *via* le DC (105 jours) et correspond aux valeurs décrites dans la littérature.

Dans la seconde partie de l'étude, nous avons utilisé cet indice (le MDC) pour estimer les probabilités d'occurrence des feux liées aux conditions climatiques au cours de l'Holocène. Pour cela nous avons extrait les normales climatiques (moyennes mensuelles des températures et précipitations mensuelles totales) passées centrées sur chaque millénaire de l'Holocène (0, 1000, 2000, ..., 11000 ans cal. BP) *via* le modèle HadCM3B-M1. Nos résultats montrent que les valeurs de MDC et de longueur de saison de feux au début de l'Holocène sont très élevées, ce qui est en accord avec la littérature qui décrit le début de l'Holocène comme une période chaude et sèche. Ces résultats confirment nos précédentes hypothèses (Chapitre III) qui identifiaient le climat comme la cause probable des incendies enregistrés à cette période. Après 7000 ans cal. BP, une forte diminution du MDC et de la longueur de saison de feux concomitante avec la diminution des pics de charbons reste en adéquation avec l'idée que le climat est la source privilégiée des feux de forêts. Jusqu'à nos jours, le MDC et

la longueur de saison de feux n'a pas beaucoup évolué, alors que les archives sédimentaires montrent une augmentation des occurrences de feux à partir de 5000 ans cal. BP. Nous avons attribué cette deuxième intensification du régime des feux aux activités humaines de plus en plus présentes en Corse, comme montré dans le Chapitre III et dans la littérature.

Dans la troisième et dernière partie de l'étude, nous nous sommes intéressé aux conditions actuelles. En effet, les dernières valeurs enregistrées pour le MDC et la longueur de saison de feux sont particulièrement élevées comparées aux valeurs des derniers millénaires et reflètent probablement le réchauffement climatique en cours. De plus, la déprise pastorale et l'abandon des terres agricoles engendrent une fermeture des milieux. Cette fermeture, associée au réchauffement climatique, pourrait provoquer une forte augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux. La prochaine étape sera de regarder l'évolution future du MDC et de la saison de feux afin de mieux appréhender les risques futurs liés à ces événements.

**Mots-clefs:** Saison de feux, paléofeux, fire weather index, modélisation, indice de sécheresse, Holocène, Corse, région Méditerranéenne, base de données Prométhée, modèles climatiques

## SHORT ABSTRACT

Currently, indices from the Fire Weather Index system (FWI) are used to predict the daily fire danger but there is no reliable index available in the Mediterranean to be compared with past fire records and check for their long term reliability. In this context, and based on variable availability requirements for index computation, we chose and tested the efficiency of the Drought Code (DC) in Corsica (main French Mediterranean fire-prone region) over the current period (1979-2016). We then used the DC as a benchmark to assess the efficiency of the Monthly Drought Code (MDC) and use it to assess the Fire Season Length (FSL), which both used to characterize the fire danger. Finally, we computed the Holocene MDC and FSL based on the HadCM3B-M1 climate model datasets and compared them with those from proxies of paleofire, vegetation, and land use retrieved from sedimentary records in three Corsican lakes (Bastani, Nino and Creno). Our strategy was to i) assess fire danger without the constraint of daily weather-data requirement, ii) reconstruct Holocene fire danger from a climate perspective and iii) discuss the role of climate and human fire drivers based on the MDC - Paleofire proxy comparisons. Using both the Prométhée fire database and the Era-interim climate database over Corsica and the current period, we showed that DC values higher than 405 units efficiently discriminated fire days from no-fire days. The equivalent threshold value from the MDC was set at 300 units. The MDC and the FSL calculated for each millennium and for the past 11 millennia before present (11 ka BP) show high values before 7 ka BP (above 300 units for the MDC) and then lower values for the mid to late Holocene (below 300 units for the MDC). Climate appears as a key driver to predict fire occurrences, promoting fires between 11 and 8 ka BP when summers were warmer than the current ones, and reducing fire danger after 7-6 ka BP due to wetter conditions. Since 5 ka BP, Human have taken control of fire regime through agro-pastoral activities, favoring large and/or frequent events despite less fire-prone climate conditions. The current fire danger and fire-season length computed over the last decades (1979-2016) both report values that are higher and longer respectively, than those assessed for the previous 6 millennia at least and comparable for those before 7 ka BP. For the next decades, due to climate change associated to land abandonment (fuel accumulation) and the increase in

human-related sources of ignition, we can expect an increase in fire danger and larger fire events.

**Keywords:** Fire danger; Fire Weather Index; Drought Code; Fire Season; Modelling; Paleofire; Fire driver; Holocene; Corsica; Mediterranean

## 1. INTRODUCTION

Fire is an integral part of ecosystems all around the world (Bürger, 2013; Pausas et al., 2009b; Pausas and Ribeiro, (n.d.); Pausas and Vallejo, 1999) and the average conditions in terms of fire seasonality, frequency, area burned, severity and intensity define the given fire regime for each type of ecosystem (Whelan, 1995). Located at the interface between temperate European and subtropical North African conditions, the Mediterranean climate is characterized by a seasonal warm and dry climate with a marked summer drought (Pausas, 2004; Sá et al., 2017), making it a fire-prone region (Keeley, 2009; Leys et al., 2014). For instance, during the last decades (1979-2016), 9 646 fires larger than 5 ha occurred in the French part of the Mediterranean Basin and 830 566 ha ( $\sim 22\,447\text{ ha.yr}^{-1}$ ) have been burned ([www.promethee.com](http://www.promethee.com)). Several factors influence the fire occurrence and behaviour. Relative roles of climate, vegetation and human are still debated (Blarquez et al., 2015; Bradstock, 2010; Vannière et al., 2008). However, climate is probably one of the superordinate driver of fires at regional scales (Westerling et al., 2006b) by controlling fire weather (Flannigan et al., 2000) (corresponding to the important factors determining fire probability of occurrence and fire behaviour (Hennessy et al., 2005)), lightning-induced ignition (Price and Rind, 1994), and the amount and distribution of flammable biomass (Bond and Keeley, 2005; Pausas and Paula, 2012). Nowadays, humans are a superimposed driver by their footprints on the vegetation composition (with crops, pasture, and deforestation) (Ganteaume et al., 2013), and its organization in the landscapes, or directly by igniting fires (accidents, negligence or intentional ignitions) (Curt et al., 2016; Fréjaville and Curt, 2015). By considering the climate as one of the main fire driver, it is likely that changes in past climate had a substantial effect on wildfire history (B rger, 2013; Fréjaville and Curt, 2015). Several studies used linear or non-linear models to relate meteorological variables to those of fires, and a large number of them used the indices of the Canadian Fire Weather Index system (FWI) (Van Wagner, 1987), which employs daily meteorological conditions to compute a variety of indices aiming to estimate fuel moisture content, potential fire speed and intensity, and an overall fire danger index. Even if the FWI system was developed for Canadian forests, it also found a wide application in the Mediterranean basin (Aguado et al., 2003; Carvalho et al., 2008; Moriondo et al., 2006) where it has good

results for predicting fire danger (Viegas et al., 1999). However, no reliable index has ever been tested to characterize both past and present variables of fire regimes, mainly due to the difficulties to obtain daily past weather-data. This study aims to test whether the Monthly Drought Code (hereafter MDC) (Girardin and Wotton, 2009), originally developed for the boreal forest, could be used for the Mediterranean region. This is in order i) to accurately assess fire danger without the constraint of daily climate-data requirement as only monthly means and maximum are required, ii) to reconstruct the Holocene (last 11 700 years) fire danger from a climate perspective using climate model simulations and iii) to discuss the respective roles of climate and humans as fire drivers.

The interest of testing the use of monthly data instead of daily data comes from the availability of climate model simulations and databases for past and future projections (Hodges, 1996; Joussaume and Taylor, 1995; Pachauri and Reisinger, 2007), and for historical observations (Dee et al., 2011) as they are mostly provided as monthly means. FWI indexes have showed their interest for Mediterranean area to predict fire danger associated to weather condition (Aguado et al., 2003; Carvalho et al., 2008; Moriondo et al., 2006). Moreover, the DC and the MDC are very well correlated in the North American region (Bürger, 2013) and are used to predict or to reconstruct fire danger and fire events. From these two points, we hypothesed that the MDC and the fire season length could also be a pertinent indicator for fire-weather condition prediction in the Mediterrean region.

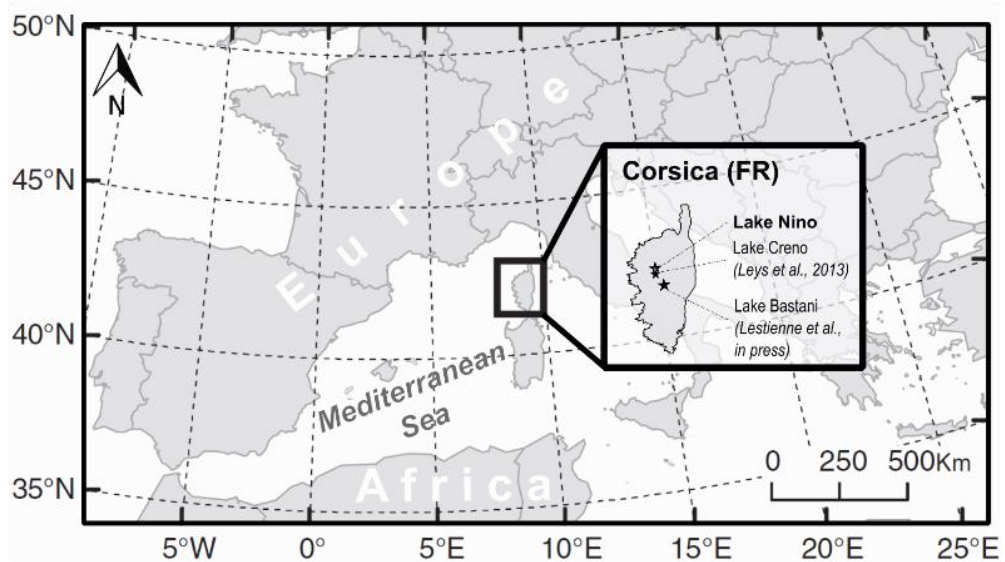
In order to validate the changes in Holocene fire-weather conditions, and based on the availability of past climate data, we computed the MDC values centred on each millennium for the past 11 millennia and compared them with regional paleofire reconstructions based on sedimentary charcoal contents from three Corsican lacustrine records (one as an original charcoal dataset presented here and two from the literature). The French island of Corsica is located in the western Mediterranean basin and is among the best preserved islands in the Mediterranean region in terms of plant diversity (Lestienne et al., 2019b; Médail and Verlaque, 1997). As in other areas of the Mediterranean region, the relative role of humans and climate in Corsican fire regime is still debated (Finsinger et al., 2010; Keeley and Zedler, 2009; Leys et al., 2014; Pausas and Fernández-Muñoz, 2012).

This study contributes to understand the underlying factors influencing fire regimes during the last millennia in the Mediterranean region both by providing a new high-resolution and well-dated charcoal record, which completes a previous study on the Corsican plant diversity during the Holocene (Lestienne et al., 2019b; Leys, 2012), and by applying and testing an alternative fire danger index adapted to past climate simulations and current observations.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. STUDY AREA AND SAMPLED LAKES

Corsica is a French island located in the western Mediterranean basin, 80 km from the Italian coast and 160 km from the French coast (**Figure IV.1**). In spite of high mountains, there are no glaciers and no permanent snow on the island (Conchon, 1986). The vegetation has been mainly composed by pinewood (*Pinus sp.*) and Ericaceous species (*Erica sp.*) during the early Holocene, before a significant change that occurred during the Neolithic (around 6 Ka cal. Before Present, hereafter Ka BP), notably with the increase in oak forests and woodlands (*Quercus sp.*), which dominated the island during remaining of the Holocene (Lestienne et al., 2019b; Reille, 1992a; Reille et al., 1999). Nowadays, the high population and settlement density on the island and pastoral activity abandonment are very important stakes that, combined with the warming climate, induce a high fire risk (Keeley, 2009; Leys et al., 2014).



**Figure IV.1** - Geographical context of Corsica (France) and lakes from which sedimentary charcoals have been extracted: Nino (the present study); Creno (Leys et al., 2013) and Bastani (Lestienne et al., 2019).

Sediment cores from three lakes have been studied for fire reconstructions, namely the lake Bastani, the lake Creno and the lake Nino, which are high altitude lakes (**Figure IV.1**) (Gauthier et al., 1983). Lake Bastani ( $42^{\circ}06' N$ ,  $9^{\circ}13' E$ ) is one of the most elevated lakes in Corsica. Because its watershed is small, and due to the topography, this windward lake is a good captor for wind-transport particles including charcoals produced in the surrounding regional area (Conchon, 1988; Roche and Loyer-Pilot, 1989). Conversely to lake Bastani, lake Nino ( $42^{\circ}25' N$ ,  $8^{\circ}94' E$ ,  $650\ 000\text{m}^2$ ) and lake Creno ( $42^{\circ}12'18''N$ ,  $08^{\circ}56'45''E$ ) (**Figure IV.1**) are lower in altitude with a larger watershed, and are expected to capture more local fires. Complete study for lake Bastani, including vegetation and fire changes reconstructions over the last 11Ka BP based on pollen assemblages and charcoal influx, is presented in Lestienne et al. (Lestienne et al., 2019b), while complete study for lake Creno, including fire changes reconstructions over the last 1 Ka BP based on charcoal influx, is presented in Leys et al. (Leys et al., 2013). The present study combined the fire reconstruction from Bastani (Lestienne et al., 2019b) and Creno (Leys et al., 2013) with the reconstruction from Nino presented here for comparison with the Monthly Drought Code computed throughout the Holocene.



## 2.2. CURRENT FIRE AND CLIMATE DATASETS

Current fires data were extracted from the Prométhée database (<http://www.promethee.com/>), which includes date of ignition, origin (anthropogenic (accidental, agricultural burning etc.) or not (naturally ignited)), size and location (2x2 km resolution) of wildfires that have occurred since 1973. To assess the fire regime, we only extracted fires larger than 5 ha in size that occurred in Corsica from 1979 to 2016 (**Tableau IV-1**).

Current climate data were extracted from ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int/>), which is a global atmospheric reanalysis from 1979, continuously updated in real time, with a spatial resolution of approximately 80 km, Corsica being covered by a total of five pixels (Dee et al., 2011) (Appendix A).

**Tableau IV-1** - Main characteristics of current fire regime and Corsican climate normal. Fires (>5 ha) have been extracted from the Prométhée database (<http://www.promethee.com/>) and climate data have been extracted from ERA-Interim Climate Models (<https://www.ecmwf.int/>).

dataset	variable	unit	value	
Fire regime	Fire frequency	#.yr <sup>-1</sup>	84	
	Burned area	max	5644	
		median	ha	10
		mean		82
	Fire Season	month	Jun to Sept/Oct	
Climate data	Mean temperature (temp)	autumn	16.2	
		winter	12.1	
		spring	20.1	
		summer	26.4	
	Mean precipitation (prec)	autumn	99	
		winter	57	
		spring	45	
		summer	27	
	Relative humidity (rh)	autumn	69.5	
		winter	66.2	
		spring	54.7	
		summer	50.9	
Wind speed (ws)	autumn	12.8		
	winter	13.6		
	spring	11.5		
	summer	9.7		

### 2.3. CHARCOAL, POLLEN AND FUNGAL REMAINS ANALYSIS

High-resolution and well-dated sedimentary records (see Appendix B for datation procedure and the resulting age-depth model) of lakes Bastani, Nino and Creno have been used to reconstruct the past fire signal and the surrounding environment.

271 (for Bastani) and 618 (for Nino) contiguous sediment samples were retrieved along cores every 10 or 5 mm (depending of the sedimentation rate). For charcoal extraction, each sample was washed on a 80- $\mu\text{m}$  mesh sieve after hydrochloric acid and hydrogen peroxide treatments according to the standardized macro-charcoal sieving method (N. Rhodes, 1998; Whitlock and Larsen, 2002). All charcoal particles from each sample have been observed with a digital microscope coupled to the high-speed camera Keyence VHX-5000. Images, observed using a 100-magnification, have been assembled to observe the entire sample on one picture with a high precision. From this picture, and adding information on charcoal visual characteristics (colour and brightness ranges), the microscope software performed a semi-automated counting of charcoal particles present in the sample: each particle corresponding to the colour and brightness ranges chosen were selected and the user checked visually each particle. For Creno, charcoal particles have been counted on 891 continuous samples using similar digital image analysis software (WinSeedle 2007, © Regent Instruments Inc., QC, Canada) (Leys et al., 2014) and results published by Leys and collaborators can be comparable to Lake Nino and Lake Bastani Paleofire records.

A total of 21138 (Bastani), 38622 (Nino) and 2705 (Creno) charcoal particles have been identified. The charcoal record was quantified by calculating the CHARCOAL Accumulation Rates (CHAR), i.e. the quantity of charcoal particles per volume of sediment and per unit of time according to the sedimentation accumulation rate estimated by the depth–age model ( $\#/\text{cm}^2/\text{yr}$ ). A trend curve was calculated from the normalized CHAR values of the three lakes (Bastani, Nino, and Creno) using the loess method (locally estimated scatterplot smoothing).

Dealing with other proxies available from Bastani lake (Lestienne et al., 2019b), the AP/NAP ratio contrasts the total number of Arboreal Pollen grains (AP) to the Non-Arboreal Pollen grains (NAP), and is a surrogate for the vegetation land-cover (i.e. woody versus non-woody cover) (Favre et al., 2008). Crop and ruderal pollen taxa are

part of NAP and are indicators of human presence (Li et al., 2008). Fungal remains, and particularly *Sporormiella sp.*, are local dung indicators, and in turn, a pasture marker and therefore a human activity marker (Baker et al., 2013). Detailed method and results for charcoals, pollen and fungal remains analysis are available in Lestienne et al. (Lestienne et al., 2019b).

## 2.4. CLIMATIC MODEL

Paleoclimate conditions were extracted from HadCM3B-M1 simulations, this model being a variant of the fully complex Hadley Centre climate model HadCM3, usually involved in Intergovernmental Panel on Climate Change assessment reports, and belonging to the HadCM3 family of climate models (Valdes et al., 2017). The HadCM3B-M1 variant of this family was originally the most commonly used (Bragg et al., 2012; Valdes et al., 2017). It is a three-dimensional, coupled atmosphere–ocean global climate model without flux adjustment, which is very similar to that described by Gordon et al. (Gordon et al., 2000). This model performed a snapshot equilibrium simulation per millennium, from which climate normals (monthly means) for main variables (i.e. air temperature and precipitation used here) were computed (Appendix C). We therefore used these datasets of climate normals for the last eleven millennia (centered at 11, 10, ..., 2, and 1 Ka BP), as well as for the control run representative of the pre-industrial period (i.e., AD *ca.* 1750, considered as equivalent to 0 BP) to compute temperature and precipitation anomalies (i.e. difference and rate of change for temperature and precipitation, respectively) for each millennium (Ramstein et al., 2007). Using an inverse-distance weighting approach on the four closest pixels from those covering Corsica, we downscaled these anomalies by applying them to the current period climate normals computed from the ERA-Interim dataset (80\*60 km resolution, 4 pixels have been used to include all Corsica) to reconstruct past climate for each Holocene millennium at the whole island scale (Hély et al., 2010; Ramstein et al., 2007).

## 2.5. FIRE WEATHER INDEX SYSTEM

The Fire Weather Index System is part of the Canadian Forest Fire Danger Rating System, which has been developed by Forestry Canada since 1968 (Stocks et al., 1989). It is a weather-based system that models fuel moisture using a dynamic bookkeeping system that tracks the drying and wetting of distinct fuel layers in the forest floor. The first three moisture codes represent the moisture contents of three superposed humus layers: the surficial layer fine fuels (FFMC, 1-2 cm deep), the loosely compacted duff layer with organic material (DMC, 5-10 cm deep), and the deep duff layer of compacted organic material (DC, 10-20 cm deep). DMC and DC indexes are combined to create a generalised index of the availability of fuel for consumption (BUI), while the FFMC is combined with the wind speed to estimate the potential spread rate of a fire (ISI). Finally, the BUI and ISI are combined to create the FWI, which represents the potential intensity of a spreading fire, and therefore the overall fire danger (Van Wagner, 1987) (**Tableau IV-2**).

Daily climatic data of the whole island from Era-interim have been used to calculate the FWI indices during the current period (1979-2016). However, we aimed to calculate an index usable for the entire Holocene, and wind speed and relative humidity changes may be less reliable when extracted from climate model simulations due to their intrinsic daily and subdaily variabilities. Therefore, we chose to use precipitation and temperature only, and consequently to focus exclusively on the Drought Code (Wagner et al., 1987). It's time lag for complete drying is 52 days, so it indicates the effects of seasonal drought on forest fuels and the probability of smoldering in deep duff layers and in large logs. It is a simple moisture bookkeeping system that uses an estimate of daily temperature to estimate a day's potential evapotranspiration, following the method of Thornthwaite and Mather (Thornthwaite and Mather, 1955), and daily rainfall to track increases in wetness of the layer. DC values between days with and without fires have been compared over the 1979-2016 period to find a DC threshold value that would characterise fire days (i.e. assumed excluding at least 75% of the no fire-days and including at least 75% of the fire-days). Then, we tested the efficiency of the Monthly Drought Code (hereafter MDC) (Girardin and Wotton, 2009) by comparing it to the DCmean. The DCmean simply represents the monthly mean of the daily values of the DC, while the MDC has been

directly created to be computed from monthly means of precipitation and maximum temperatures. For the Canada, a MDC > 280 has been associated to an extreme drought and correspond to a high fire danger (Girardin and Wotton, 2009). We therefore searched for a threshold allowing to detect months with high fire danger based on Corsica MDC values computed with the Era-Interim database over the 1979-2016 period. Then, the MDC values have been computed for the entire Holocene (0 to 11 Ka BP) based on the HadCM3B-M1 climate datasets in order to compare the MDC trend with the paleofire trend from charcoal records. The MDC is not intended to be used in operational situation where daily weather data are available for fire managers, but it could be very helpful to highlight past or future changes in droughts and consequences on fire danger (Brewer et al., 2007; Girardin and Wotton, 2009).

*Tableau IV-2 - List and abbreviations of the Fire Weather Indices (Wagner et al., 1987) used in text.*

Symbol or abbreviation	Definition
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
DMC	Duff Moisture Code
DC	Drought Code
ISI	Initial Spread Index
BUI	Buildup Index
FWI	Fire Weather Index
DSR	Daily Severity Rating

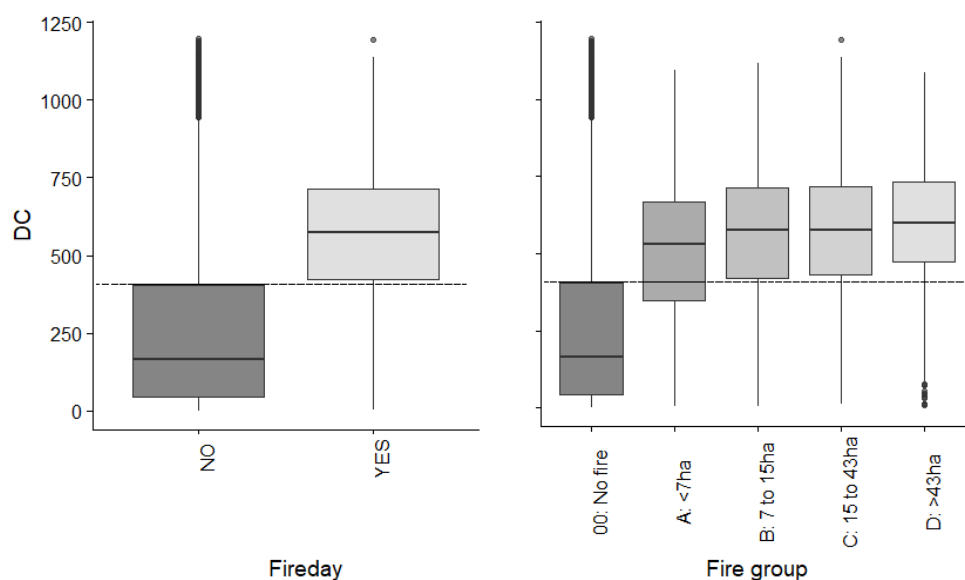
## 2.6. FIRE SEASON

Based on historical analysis of MDC values, and according to the method originally developed by Hély et al. (Hély et al., 2010) for the DC but adapted here to the MDC, we used the MDC threshold value (presented in the results section) to calculate the Fire-Season Length for current period and for each Holocene millennium. Basically, for all months with MDC values above the threshold, we considered the full month length (30 or 31 days) as part of the Fire Season. To define the starting and ending months of the Fire Season and to add the related number of days (i.e. <30 or 31 for each month), we used a basic linear interpolation between each of these months reporting MDC values lower than the threshold value, but just preceding or following a month with above-threshold MDC value.

### 3. RESULTS

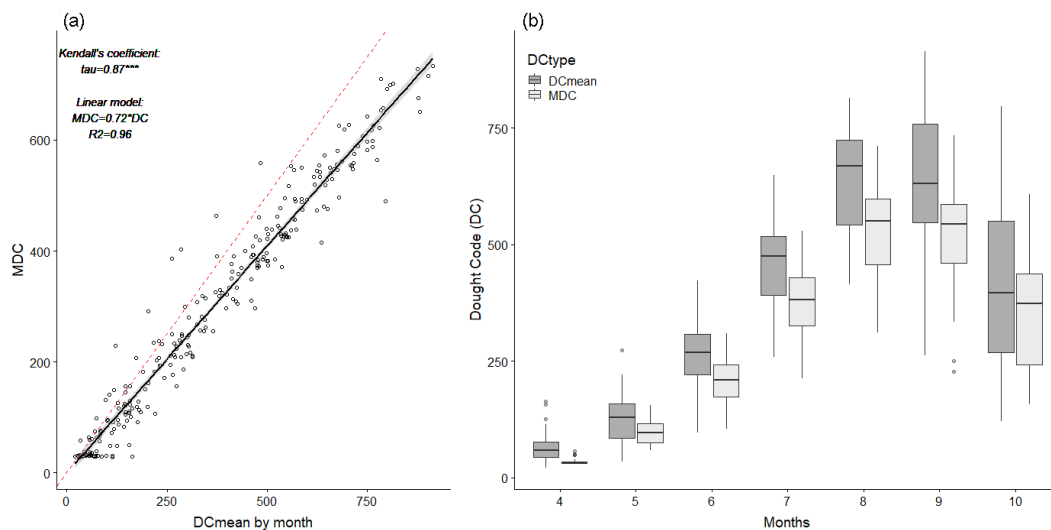
#### 3.1. DC AND MDC EFFICIENTLY DETECT FIRE DAYS OF THE CURRENT PERIOD

As compared to the other indices of the Fire Weather Index (Appendix D), the DC performs better as it significantly discriminates days with and without fires (**Figure IV.2**). Fire days from the Prométhée database show median and mean DC values that are ca. 300-unit higher (572 and 548, respectively) than those recorded during days for which there were no fire reported (166 and 250, respectively). The larger the fire, the higher the DC (**Figure IV.2**). In order to exclude most of the no-fire days without excluding too many fire days, we conservatively defined the DC value of 405 units (75% no-fire days were excluded, while 78% of fire-days were conserved) as the threshold above which days are considered as potential fire days and which are also considered as belonging to the Fire Season.



**Figure IV.2** - Comparisons of DC distributions between days with or without fire reported (left panel, *t*-test,  $p > 0.001$ ), and among increasing fire size classes (in ha, corresponding to the quartiles) as compared to the no-fire class (right panel). For both panels, fires and related days were extracted from the Prométhée DC. Dotted line in each panel corresponds to the chosen threshold (405 units) in order to calculate the Fire-Season Length. It excludes 75% of the no-fire days and includes 78% of the fire days.

Monthly means of daily DC (i.e. DCmean) over the 1979-2016 period and for each month of the Fire Season (April-November) have been compared to the MDC values computed over the same months and period. DCmean values are slightly higher than MDC values, yet their relationship (linear regression model) and their covariation (non-parametric Kendall rank correlation coefficient) are highly significant (**Figure IV.3 (a)**). Moreover, the seasonal trends reported by both metrics are very similar (**Figure IV.3 (b)**), suggesting the use of MDC as a good proxy of the DC and therefore of the fire danger to be tracked. Using the linear relationship between DCmean and MDC, we inferred the 300-unit MDC as the threshold to be used to compute the fire-season length and to analyze its change through time.



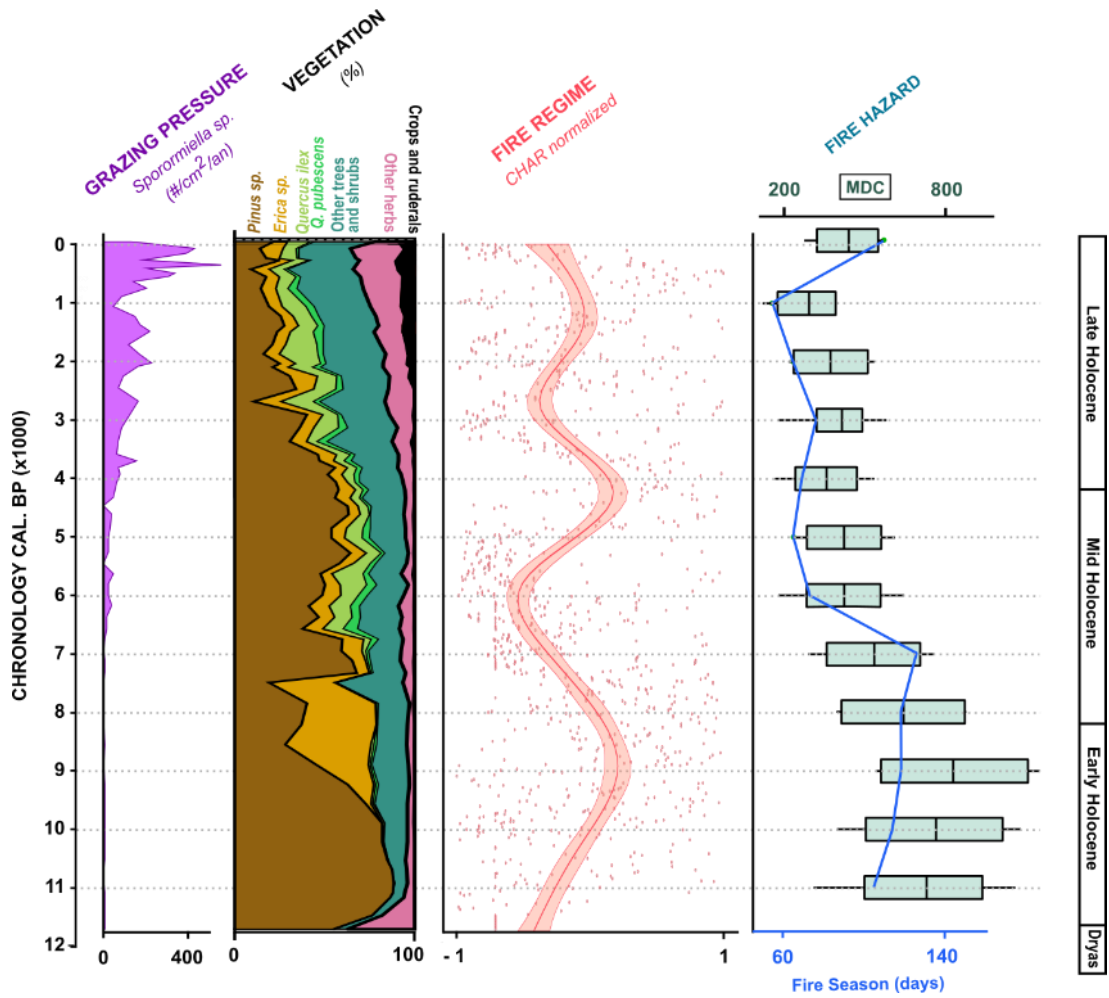
**Figure IV.3** - (a) Correlation between MDC and DCmean using monthly values from April to October over the 1979-2016 period ( $n=532$  corresponding to 7 months each year during 38 years). The dotted red curve represents the perfect match between DCmean and MDC, while the black curve is the linear regression model found, and for which the normal distribution and homoscedasticity of residuals have been tested.; (b) DCmean and the MDC changes along the Fire Season (currently set from April to October).

Then, the MDC over the 1979-2016 period and for each month of the Fire Season (April-October) have been compared to the burned area (ha) and the number of fires by month to test the efficiency of the MDC to discriminate fire prone months and to test the threshold. Both burned area and number of fire are significantly correlated with the MDC values (non-parametric Kendall rank correlation coefficient). By fixing the threshold at 300-units as showed previously, all the most fire prone months (> 5 000 ha and > 200 fires) can be discriminate (Appendix E).



### 3.2. CHANGE IN MDC AND FIRE SEASON DURING THE HOLOCENE

The MDC values between June and October were particularly high at the beginning of the Holocene (11 Ka BP -9 Ka BP) (**Figure IV.4**), with the highest value of 685 at 9 Ka BP. Then, the MDC decreased until 6 Ka BP and remained stable (i.e. around 400) over the five next millennia, the MDC value at 1 Ka BP being the lowest MDC value over the last eleven millennia (314). Finally, a new increase in MDC occurred, up to 419 units for the current period. Currently, the calculated Fire Season starts in June and ends in October, lasting 111 days on average (**Figure IV.4, Tableau IV-3**). Over the entire Holocene, the Fire-Season Length has ranged from 54 to 126 days, with the longest Fire Season from 11 to 7 Ka BP (from 106 to 126 days, respectively). As nowadays, during this early Holocene period, the Fire Season started in June and ended in October. The sharp decrease in Fire-Season Length between 7 and 6 Ka BP represented a delayed start (in July), while the length stabilized around 70 days. Afterward, it shortened again between 2 Ka BP and 1 Ka BP, reaching the shortest duration (64 and 54 days, respectively). At that time, Fire Season both started later and ended later (i.e. from July to September, respectively).



**Figure IV.4** - Changes in MDC, fire-season length, fire signal (from CHAR), vegetation (from pollen composition) and pastoral activities (from fungal remains) during the Holocene. MDC and Fire-Season Length have been computed at the island scale, while charcoals, pollen and fungal remains have been extracted from lake sediments. “MDC” encompasses June, July, August, September and October. Creno data, for comparison, have been extracted from Leys et al., 2013 (Leys et al., 2013).

**Tableau IV-3** - Details of MDC and Fire Season throughout the Holocene (last 11 millennia Before Present).

Ka BP	Mean MDC		Fire Season	
	During summer	Starting	Ending	Length
0	419	June, 11th	October, 2nd	111
1	314	July, 21th	September, 15th	54
2	379	July, 26th	September, 30th	64
3	394	July, 22th	October, 9th	77
4	365	July, 21th	October, 1st	70
5	412	July, 28th	October, 4th	66
6	406	July, 23th	October, 5th	72
7	482	June, 3rd	October, 9th	126
8	556	June, 13th	October, 10th	117
9	685	June, 18th	October, 16th	118
10	628	June, 17th	October, 10th	113
11	598	June, 18th	October, 4th	106

### 3.3. HOLOCENE PALEOFIRE AND ENVIRONMENTAL CHANGES FROM LACUSTRINE SEDIMENT RECONSTRUCTIONS

Over the Holocene, lacustrine sediment cores of Creno (Leys et al., 2013), Bastani (Lestienne et al., 2019b), and Nino (Appendix F) showed similar trends of temporal fire signal recorded by charcoals (**Figure IV.4**). From the point of view of fire signal (charcoal records) and fire hazard (MDC and fire season), we highlighted two phases. The first phase lasted from 11 ka BP to 5 ka BP. During this phase, we observed that changes in both fire signal and fire hazard values were synchronous: the highest fire signal was observed when the fire hazard was high, and inversely. The very early Holocene (before 11 ka BP) recorded almost no fire as compared to later on. This was followed by a period characterized by a strong increase of the fire signal, which matches with the period of highest fire hazard values. Then, a decrease in both fire hazard and fire signal was observed. The second phase spanned over the last five millennia. It was characterized by a new increase in fire signal after 5 ka BP, such increasing trends not been observed in the fire hazard values that stayed very low. Even though a decrease was observed between 3 and 2 ka BP, the fire activity stayed high until current period.

The synthesis of the palynological and fungal remain analyses of lake Bastani showed that before 11 ka BP, the AP/NAP was low, meaning that the herbaceous taxa were dominant (**Figure IV.4**). Then, the ratio increased and stayed stable until 7 ka BP with the dominance of *Pinus sp.*, followed by the *Erica sp.* from 9 ka BP. The establishment of *Quercus sp.* and the increase in *Sporormiella sp.* have occurred since 7 ka BP, while the first synchronous increase in both crops and ruderals taxa, and *Sporormiella sp.* influx has occurred since 5 ka BP.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. THE EFFICIENCY OF THE DC AND MDC TO TARGET POTENTIAL FIRE DAYS AND ASSESS THE FIRE-SEASON LENGTH

Beyond the ability of the FWI indexes that has been previously demonstrated for several Mediterranean countries (Bedia et al., 2014; Camia and Amatulli, 2009; Carvalho et al., 2008; Dimitrakopoulos et al., 2011; Fréjaville and Curt, 2015; Moriondo et al., 2006) to predict the fire danger on time (Dupire et al., 2017; Lahaye et al., 2018a; Ruffault et al., 2016, 2017a, 2017b; Schunk et al., 2017), our results suggest their valuable use, especially the DC index, for detecting current days with or without fires and assessing ranges of fire sizes. The DC, with both its 405-unit threshold and its simplest computation only relying on precipitation and temperature, appears to be therefore the best fire index candidate to monitor the probability of fire occurrences in the Mediterranean region when daily conditions are available. Moreover, its threshold value allows both to estimate the fire danger based on the daily DC values, and to compute the length of the active Fire Season and, in turn, its onset and termination dates.

Our results also showed that when daily conditions are not available (for past or future periods for which only monthly trends are reconstructed or projected), the MDC index is a very good surrogate of the DC to assess fire danger for the Mediterranean region. Indeed, the highly significant and strong correlation found between DC and MDC was

even higher than that for the boreal region for which it had been created originally (Girardin and Wotton, 2009), and later on applied (Bürger, 2013). For the MDC, a 300-units threshold have been determined and successfully tested to detect the most fire prone months. A way to validate the use of the MDC is the similar length of the Fire Season calculated with the DC versus the MDC (105 versus 111 days, respectively), and the fact that such inferred lengths fitted well with the current reported Fire-Season Length observed in the Mediterranean region (Bedia et al., 2014; Moriondo et al., 2006).

#### 4.2. HOLOCENE HISTORY: FROM CLIMATIC TO ANTHROPOGENIC FIRES

The early Holocene (11 ka BP) was characterized by the post-glacial recolonization of the woody vegetation (Reille, 1992a; Reille et al., 1999), well represented by *Pinus sp.* in our records. The high fire signal (**Figure IV.4**) suggests a sustained fire regime in terms of fire frequency and biomass burned. This trend was observed in the sediments of the three lakes (with a 500-year earlier start for lake Creno (Leys et al., 2014), suggesting a regional trend. In the same time, the MDC was high, which fits well with the dry summer conditions reconstructed based on fossil chironomid by Samartin et al. for Tuscany (Italy) (Samartin et al., 2017). The large amplitude of the values, added to the temperature and precipitation anomalies (Appendix C), illustrates the accentuated seasonality due to insolation increase (Magny et al., 2007; Samartin et al., 2017). These results are in line with other studies, which described the warmer condition of the early Holocene (Drescher-Schneider et al., 2007; Rossignol-Strick and Paterne, 1999; Vannièrè et al., 2011) and confirm our previous hypothesis (Lestienne et al., 2019b), which stated that climate, adding to the increase in the fuel availability, may explain Corsican fires between 11 ka BP and 7 ka BP (Reille et al., 1997, 1999). The fire signal recorded was quite similar between lake Bastani and lake Nino during this period, with similar peak values (e.g. 9 and 8 ka BP) and low values (e.g. 10 ka BP). The similarity exists but is less obvious for lake Creno, probably due to the overall lower charcoal signal recorded for this sequence (Leys et al., 2013). This strengthens the idea of a regional trend dominated by many fire events occurring both in Corsica and elsewhere over the Mediterranean basin and adjacent regions (Vannièrè et al., 2008, 2016).

The period starting at 7 ka BP highlighted a simultaneous strong decrease in charcoal peaks (in particular for both Bastani and Creno lakes), and a sharp change in vegetation composition, with the decrease in *Pinus sp.* and *Erica sp.* and the increase in *Quercus sp.* (Reille et al., 1997, 1999). Such vegetation change was simultaneous to a strong decrease in the MDC values and the shortening of the fire-season length, likely due to wetter spring conditions (Appendix C). Such wetter climate after 7 ka BP has been reported in several studies (Colombaroli et al., 2009; Leys et al., 2014; Reille et al., 1999), but our results permit to highlight the rapidity of this change and its targeted season, and so, to attribute this major event to a climatic cause. The stability of charcoal signal, MDC and Fire-Season Length until 5 ka BP show that the ecosystem reached a new equilibrium more adapted to these wetter climate conditions.

A significant increase in *Sporormiella sp.* spores indicates the presence of large herbivores around the lake, at least since 5 ka BP. The frequentation of the lake area by livestock seems to be a plausible explanation of such dung fungal spores increase. Moreover, these clues of human presence were followed by an increase in charcoal content for both Bastani and Nino lakes (and a bit earlier at Creno), which can be interpreted as land use transformation into crops and pastures and the associated deforestation (Iglesias et al., 2019; Janny and Costa, 2004). That is in good accordance with archaeological knowledge. The Chalcolithic period in Corsica with megaliths and fortified habitats is considered as a population growth period (Morelli and Francalacci, 2000a). The increase in biomass burning reduced the tree proportions and opened the landscape as attested by the AP/NAP ratio decrease, particularly marked since 3 ka BP. This forest opening during the late Holocene has also been observed in Sardinia (Beffa et al., 2016), Iberia (Pausas, 2004) and southern France, including Corsica at Creno lake (Reille et al., 1999). Moreover, our results show a clear increase in anthropogenic activities indicators such as pollen of ruderal and crop species and a clear increase in pasture indicators such as *Sporormiella*. In agreement with other studies (Beffa et al., 2016; Colombaroli and Tinner, 2013; Vannière et al., 2008), we mainly attribute this opening (increase in NAP and cultural indicators) and the increase in fire events to human activities (crops and pasture), also attested in others Mediterranean islands like Sardinia (Beffa et al., 2016), Sicily (Tinner et al., 2009) or Majorca (Bujarhs et al., 1994). The stability of relatively low MDC and short Fire

Season are arguments to suggest that the main driver for fire activity had shifted from climate to humans since 5 ka BP.

A new decrease in the MDC occurred between 2 ka BP and 1 ka BP reaching the lowest values of both MDC and Fire-Season Length over the Holocene, then followed by a strong increase in grazing indicators and charcoals peaks still indicating that human activities contributed to increase fire frequency (Vannière et al., 2008). These human activities, in particular crops and pasture, affected all ecosystems, from the subalpine pastoralism to the Mediterranean olive groves (Lestienne et al., 2019b). Humans have opened more and more the landscape up to the current Corsican landscape. This period of demographic increase is probably linked to the strong Tuscan immigration into Corsica around 1 ka BP (Morelli and Francalacci, 2000a) and has contributed to increase fire frequency over the last centuries.

The strong similarities between the three lakes attest their good quality as paleofire recorders at a regional scale. Their records have the same early Holocene history, which attests that a common driver, probably climate, controlled the entire Corsican fire regime. The differences observed after 6 ka BP should be the results of local events and slightly different human histories occurring everywhere in Europe from this period (Carcaillet, 1998; Clark et al., 1989; Colombaroli et al., 2007; Janny and Costa, 2004; Vannière et al., 2008, 2016).

#### 4.3. CURRENT CLIMATE IS GETTING CLOSE TO THE EARLY HOLOCENE CLIMATE CONDITIONS

The early Holocene climate is known to have been dry and warm, with high seasonality (i.e. strong difference between summer and winter) (Drescher-Schneider et al., 2007; Eastwood et al., 2007; Rossignol-Strick and Pateme, 1999; Vannière et al., 2011). Our results confirmed a climatic shift staged between 7 ka BP and 5 ka BP. During this transitory period, the MDC decreased below 400 units and the Fire Season became shorter (less than 100 days). However, the most recent value of the MDC (corresponding to current period), shows an increase and this increase is associated with a strong increase in the Fire-Season Length resulting from an earlier onset in June. For the first time since 5 ka BP, the fire-prone climatic conditions (i.e. MDC

combined to the Fire-Season Length) are closer to those from the early Holocene, and these conditions are favourable for fire ignitions and propagation (Keeley, 2009; Leys et al., 2014). Moreover, the last few decades are marked by a decline of pastoral activities and an increase in land abandonment, causing a closure of the environment (Moreira et al., 2011; Mouillot et al., 2005). This closure combined with the global warming, recorded in our results, could promote future uncontrolled fire episodes (Giannakopoulos et al., 2005; Moriondo et al., 2006; Mouillot et al., 2002, 2003).

#### 4.4. LIMITATION OF THE STUDY

The calculation of the MDC needs only climate data (temperature and precipitation) and changes in the vegetation or the human pressure on ignitions are not considered to assess changes in the fires danger. However, through its composition, density, spatial arrangement and humidity, vegetation directly influence the type of fire and its characteristics (eg. Beffa et al., 2016; Curt et al., 2007; Leys et al., 2018). Currently, a high fire danger is correlated to a fire day (DC) or fire prone month (MDC). However, past vegetation was different and could promote more or less fires. A way to improve the robustness of this method should be to test it in different landscapes with different vegetation.

### 5. CONCLUSION

In this study, we have tested first the efficiency of the DC to discriminate fire days from no-fire days over the present (1979-2016 period), and the efficiency of the MDC, which is a simplified version of the DC, to discuss climate vs other fire drivers during the Holocene. The MDC was used here for the first time for both a Mediterranean region (Corsica) and the entire Holocene. Combined to three paleofire records obtained from sedimentary charcoals quantification and to the vegetation and human activities dynamics reconstructed from pollen and fungal remains, the MDC permitted to point out the drivers of fire history in Corsica for different periods. Firstly, the dry and warm summer conditions have induced frequent fires and important biomass burning before 7 ka BP. Then, the wetter conditions induced the decrease in fire



frequency, which allowed long-term post-fire succession and in turn, a closure of the forest. Finally, from 5 ka BP, humans might have been the main driver of vegetation dynamics and of fire occurrences by deforesting, developing crops and pastures using fire, despite wetter and therefore less fire-prone climate conditions.

MDC appears as a simple but efficient complementary tool to go back into the past and to understand the underlying factors of fires by reconstructing the Holocene climate-related fire danger. It allows avoiding the difficulties in acquiring and/or simulating daily data, and it improves our understanding of wildfire metrics (including climate-related fire danger and Fire-Season Length) at regional scale. Nevertheless, it is necessary to stay aware of others drivers (i.e. humans and vegetation types) in order to understand the complexity of fire regime. The modern decrease in pastoral activities associated to the land abandonment, combined to the increase in fire frequency and intensity expected in the next decades due to global warming and human density increase, threat most European landscapes. The current fire danger and length of the Fire Season) are, for the first time since millennia, as high and long, respectively, as that of the early Holocene period. The next step would be to calculate MDC values from future climate scenarios in order to assess the future trend of fire risk.

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This research was funded by Region Bourgogne Franche-Comté through Chrono-environnement laboratory, the MSHE Ledoux and the projects ONOMAD, QMedFire and ENVILEG led by BV. The CNRS PaléoMEx-MISTRALS program also supported this study. This study is part of the PAGES-GPWG activities.

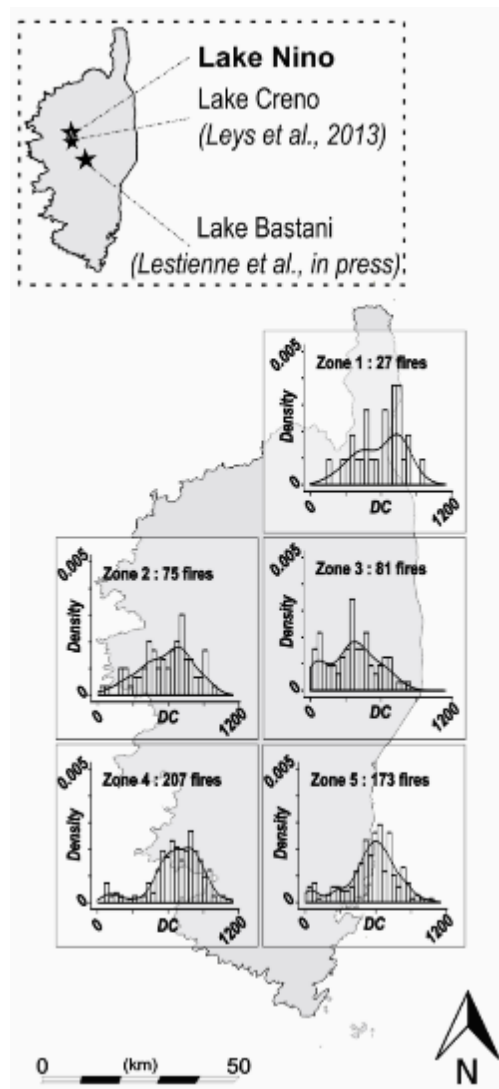
We thank the Environmental Office of Corsica, the town of Ghisoni and the National Forest Office for the lake access permit. We thank also Bérangère Leys for giving us the full access to Lake Creno charcoal data.

The authors declare no conflict of interest.

## ANNEXES

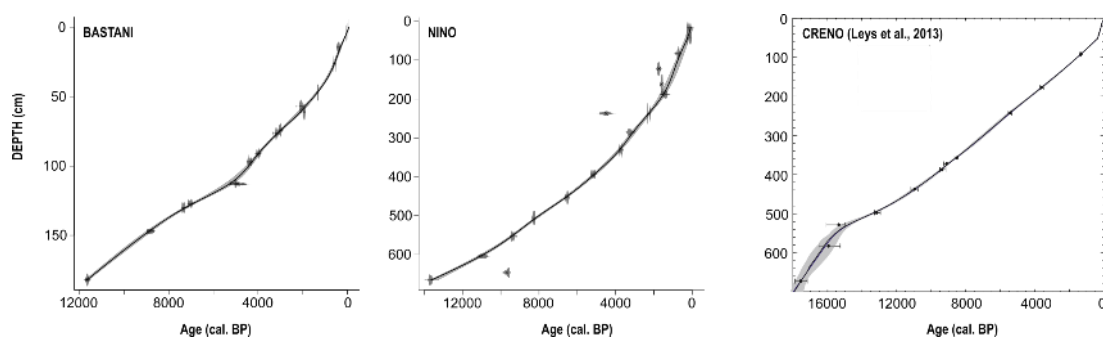
*Appendix A*

The figure shows the high spatial variability in terms of fire occurrences reported since 1979 in Corsica (the southern region recording more fires than the northern part ([www.promethee.com](http://www.promethee.com)) and the related distribution of the DC values for fire days from the five ERA-interim pixels covering Corsica.



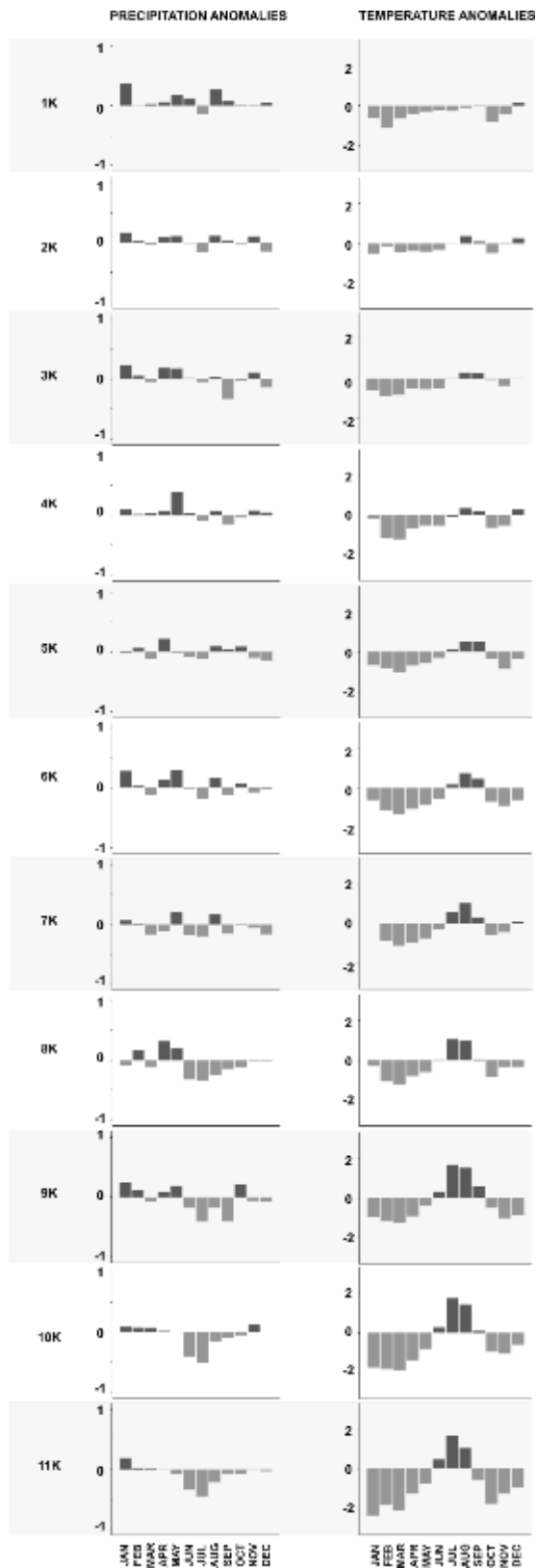
## Appendix B

Age-Depth Model for Bastani (Lestienne et al., 2019b), Nino and Creno (Leys et al., 2013) lakes sequences. The chronological control was based on a combination of (i) 10 (Bastani) / 18 (Nino) / 11 (Creno) radiocarbon dates obtained at the Poznan Radiocarbon Laboratory on diverse macro-remains of terrestrial origins (leaves, seeds, charcoals and wood). (ii) One age estimated for the main Late-glacial/early-Holocene transitions indicated by the pollen stratigraphy and the geochemistry data (Bastani). (iii) 2 (Bastani) / 7 (Creno) radiometric markers derived from short-lived radionuclides ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) for the top of the core. Based on these chronological markers, Clam package (R software, R. Core Team, 2018) has been used to generate an Age Depth Model within 95% confidence limits (Blaauw, 2010).



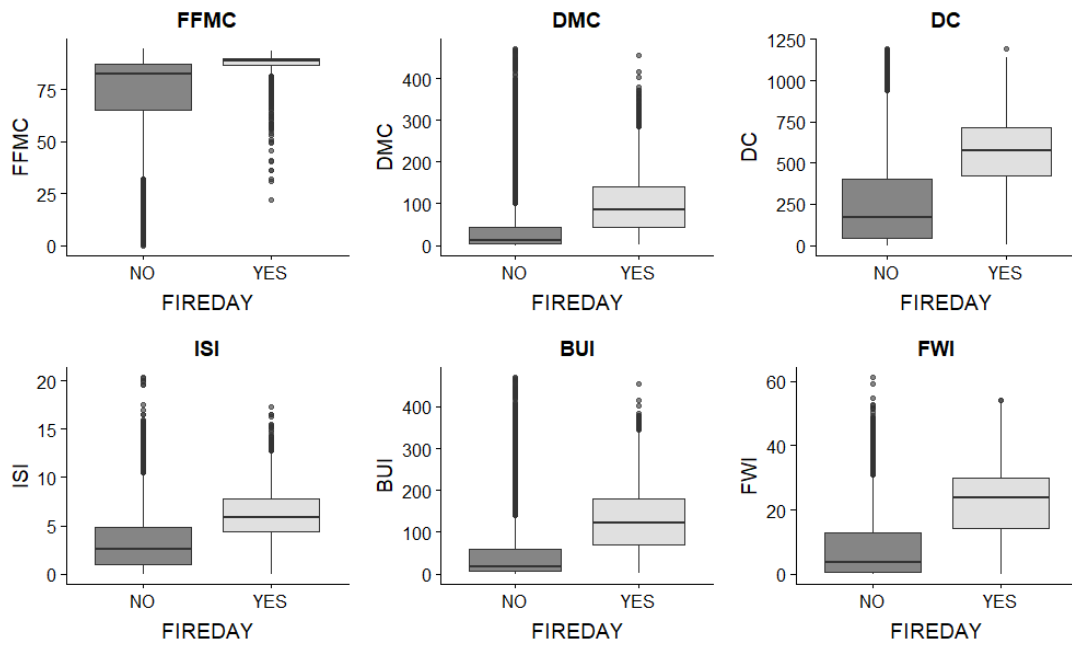
## Appendix C

Precipitation and temperature anomalies during the Holocene calculated from the UGAMP dataset (<http://ugamp.nerc.ac.uk/>).



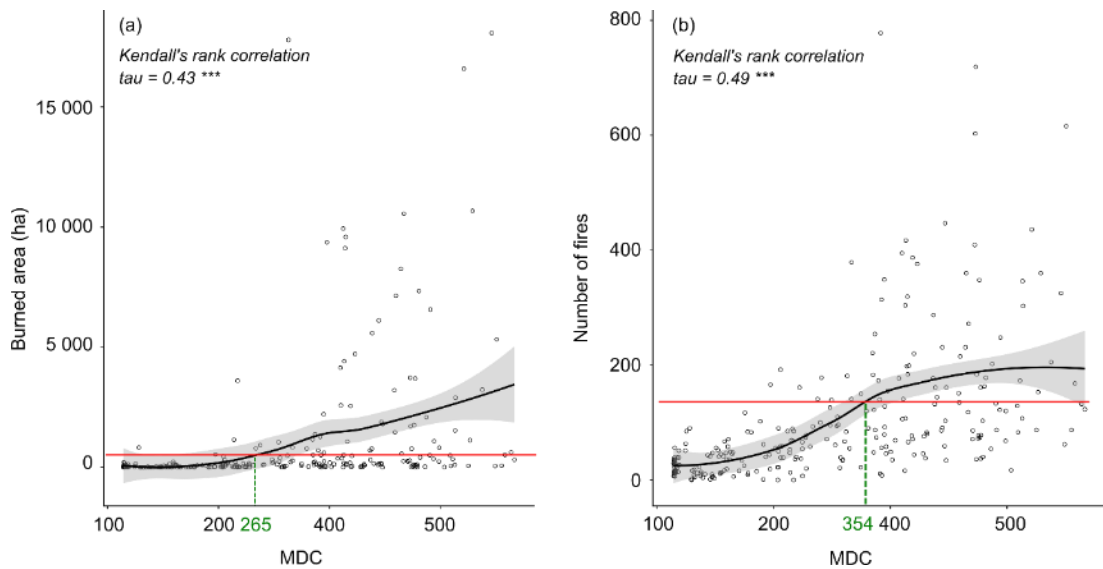
### Appendix D

Comparison of FWI indexes in function of fire day. P-value are  $<0.001$  for all indexes (t-test with resampling to have groups with the same size).



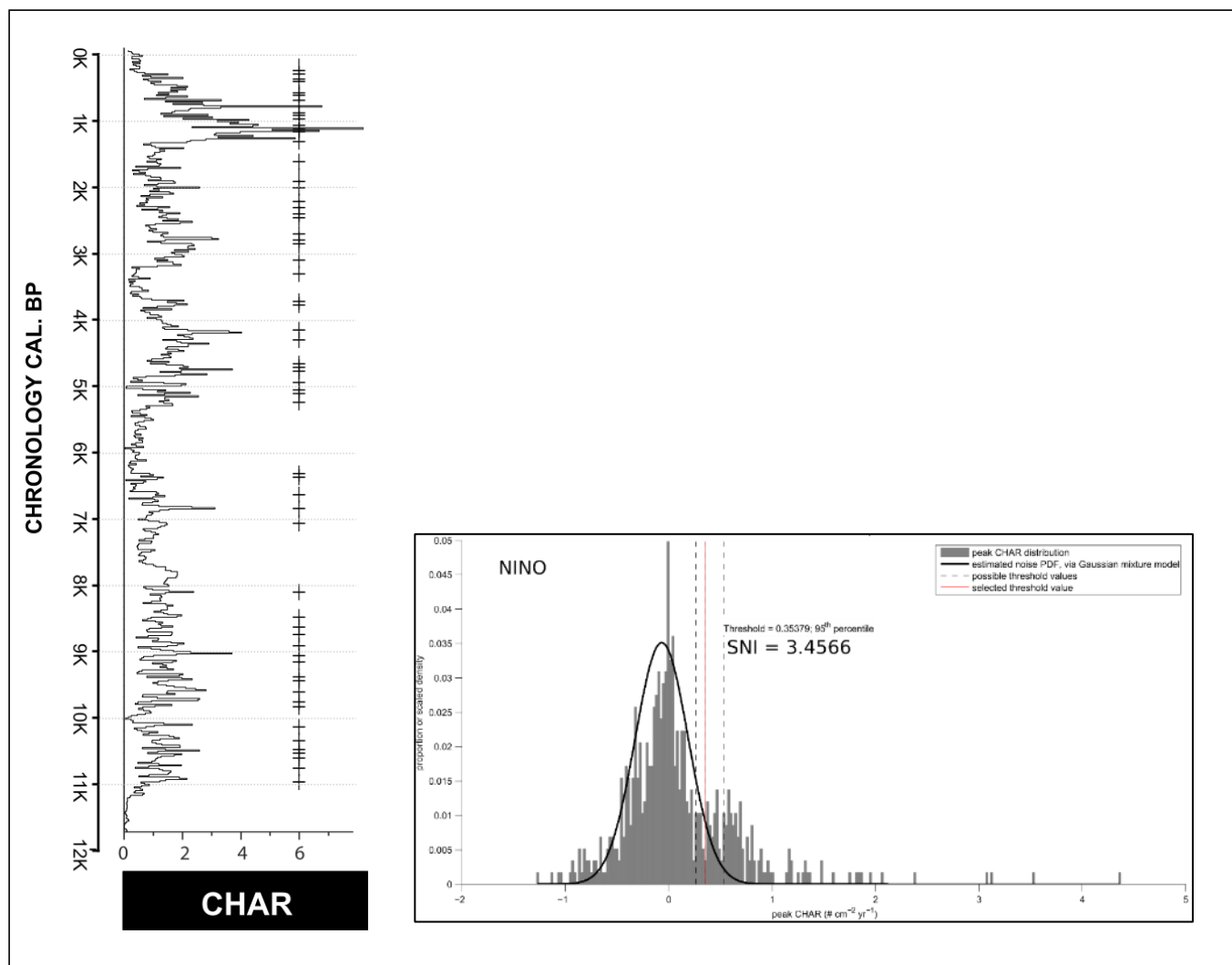
### Appendix E

(a) Total burned area (m<sup>2</sup>) and (b) number of fires between April and October over the 1979 – 2016 period in function of the MDC values. The trend is calculated with the loess method. The red line represents the most fire prone months (4st quartile), and the green line illustrate to MDC value corresponding. The threshold value corresponding to the most fire prone month is 265 (considering the burned area) and 354 (considering the number of fires), i.e. an average of 310 which is very close to the threshold value estimated previously from the DC.



## Appendix F

Charcoal Accumulation Rate (CHAR, #/cm<sup>2</sup>/yr) recorded at Lake Nino (Signal-to-Noise index (SNI) > 3).



---

---

## Chapitre V.

### INTEGRATION DES DONNEES PASSEES DANS L'EVALUATION DE L'ALEA INCENDIES EN MEDITERRANEE DUE AUX CLIMAT POUR 2020 - 2100

---

---

#### **Integrating past data in climate-driven Mediterranean fires hazard assessment's for 2020-2100**

**Marion Lestienne**<sup>1,2</sup>, Boris Vannière<sup>1,3</sup>, Thomas Curt<sup>4</sup>, Isabelle Jouffroy-Bapicot<sup>1</sup>,  
Christelle H ly<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup>Chrono-environnement, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

<sup>2</sup>ISEM, Université Montpellier, CNRS, EPHE, IRD, Montpellier, France

<sup>3</sup>MSHE Ledoux, CNRS, Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France

<sup>4</sup>IRSTEA, Mediterranean ecosystems and risks, Aix-en-Provence, France

<sup>5</sup>EPHE, PSL University, Paris, France



Revue ciblée

*Global and Planetary Change*



## **RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

Le réchauffement climatique mondial prévu pour le 21<sup>ème</sup> siècle pourrait augmenter l'intensité et la fréquence des feux de forêts, menaçant ainsi de nombreux écosystèmes dans le monde. Parce qu'il s'agit d'une région très peuplée et historiquement sujette aux incendies, le bassin Méditerranéen, reconnu comme un hotspot régional de biodiversité, est particulièrement menacé par ces changements. Dans cette région, la Corse abrite l'un des écosystèmes les mieux préservés mais aussi l'un des plus sensibles aux changements en termes de climat ou de perturbations. Dans ce contexte, cette étude vise i) à estimer l'évolution future de l'aléa climatique des feux en Corse jusqu'à la fin du siècle en fonction de deux scénarios RCP utilisés par le GIEC (RCP4.5 et RCP8.5), et ii) à discuter de ces résultats au regard des évolutions passées en termes de régimes de feux Holocène. Pour ce faire, nous avons calculé le MDC (indice mensuel de sécheresse) et la longueur de saison de feux jusqu'à 2100. Nous avons ensuite comparé ces valeurs aux données passées, soit pour les 12000 dernières années.

Dans une première partie, nous avons estimé puis comparé nos prévisions pour le futur en termes d'aléa de feux aux prévisions disponibles dans la littérature. Nos résultats prévoient une augmentation de l'aléa de feux et un allongement de la saison de feux dans les prochaines décennies. Ces augmentations seront similaires pour les deux scénarios jusqu'à environ 2040, puis les valeurs se stabiliseront dans le cas du scénario RCP4.5 alors qu'elles continueront leurs ascensions avec le scénario RCP8.5. Des études similaires, basées sur un indice issu du système FWI en Méditerranée ont montré les mêmes tendances d'augmentation mais seulement en comparant deux périodes de 30 ans (début et fin du 21<sup>ème</sup> siècle) alors que l'information ici a été synthétisée au pas de temps décennal afin de pouvoir apprécier les éventuelles inflexions dans la tendance globale. Contrairement à notre approche parcimonieuse, qui ne requiert que les températures maximales et les précipitations mensuelles pour le calcul de MDC et de la longueur de la saison de feux, les études précédentes basées sur le FWI ont nécessité des variables additionnelles (i.e. vitesse du vent et humidité relative). Notre approche est donc plus facilement transposable pour calculer l'aléa climatique de feux sur d'autres périodes, notamment dans le passé.

Dans une seconde partie, nous avons tenté d'estimer si les futurs régimes de feux seront similaires à ceux enregistrés au début de l'Holocène, période durant laquelle le climat a été le plus favorable aux feux au cours des derniers 11000 ans. Bien qu'il augmente dans le futur, l'aléa de feux estimé par le MDC n'atteindrait pas les valeurs maximales holocènes. Par contre, la longueur de saison de feux serait plus étendue qu'au cours des 12 derniers millénaires et ceci s'explique par la superposition de deux processus : la faible insolation globale qui produit un faible contraste saisonnier, et le changement global qui induit l'augmentation globale des températures et la forte diminution des précipitations répartie sur tous les mois de l'année dans le bassin Méditerranéen. A l'opposé, au début de l'Holocène la saisonnalité était beaucoup plus importante et l'aridité était concentrée exclusivement sur deux ou trois mois l'été. A cela, ajoutons que la végétation actuelle, très diversifiée, mais principalement arbustive et fragmentée est également très différente de celle du début de l'Holocène qui était spatialement beaucoup plus continue et dominée par les pins et la bruyère. Enfin, aujourd'hui, les feux sont principalement dus à l'Homme (mises à feu accidentelles ou intentionnelles). Pour la première fois depuis presque 12000 ans, la Corse est confrontée à une influence combinée de la sécheresse et des activités humaines, et cette combinaison va probablement promouvoir des feux plus fréquents et plus extrêmes. De telles augmentations, combinées à l'augmentation des interfaces villes / espaces naturels pourrait directement menacer la population, les habitations et les infrastructures.

Afin d'améliorer notre étude, il sera intéressant de modéliser la végétation future afin d'avoir plus de scénarios incluant l'ensemble des interactions climat – feux – végétation – sociétés. De plus, nous pourrions étendre nos prévisions jusqu'à 2300 à partir des extrapolations des scénarios RCP.

**Mots-clefs:** Aléa feux, saison de feux, FWI, scénarios RCP, modélisation, Corse, changements climatiques, Indice de Sècheresse mensuel

## SHORT ABSTRACT

Global warming predicted by climate models for the 21<sup>st</sup> century could increase the intensity and frequency of fires and threaten most ecosystems if precipitation increase doesn't compensate the temperature increase. Because it is a populous and historical fire-prone region, the Mediterranean basin would be particularly threatened by these changes. In this region, the island of Corsica (France), hosts one of the best-preserved Mediterranean forest ecosystems but at risk faces climate and disturbance-regime changes as highlighted by Paleoecological studies. In this context, our study aims: i) to estimate the future climate-related fire danger in Corsica for the period 2020-2100, based on two RCP scenarios (RCP4.5 and RCP8.5), and ii) to discuss these fire-danger future scenarios in a longer-term framework encompassing the last 11700 years for which fire hazard has been previously assessed. The fire danger assessment combines the fire hazard related to drought intensity and the Fire Season Length representing the temporal drought range. Using an ensemble of future climate simulations from two IPCC-RCP scenarios, we computed the Monthly Drought Code to assess fire hazard, and we used the number of months recording MDC values higher than 300-units, according to present-days estimations, to assess the fire season length. Our results showed that the fire hazard and the fire season length would both increase over the next decades due to the combined effect of temperature increase and precipitation decrease over the Mediterranean basin, whatever the RCP scenario used. The MDC will not reach the maximum Holocene values recorded 9000 years ago, but the Fire Season Length will (RCP4.5), and will even exceed (RCP8.5) the maximum Holocene value recorded 7000 years ago after 2040. For the first time in the Holocene, we are confronted to an increase in both the number of months with long dry and warm conditions as well as human influences, such combination likely promoting an increase in fire hazard. For the next 30 years, the game seems to be played already because both studied RCP scenarios resulted in the same fire predictions. However, our current policies will influence the climate evolution at a longer scale and we need to reconsider our political choices to avoid catastrophic consequences in terms of ecology and/or economy (ex: extreme wildfires close to the cities, biodiversity losses, etc.).

**Keywords:** fire hazard, fire season, FWI, RCP scenario, Monthly Drought Code, modelling, Corsica, climate change.

## 1. INTRODUCTION

Over the past decades, a surge in the number of large and uncontrolled fires has occurred on all terrestrial ecosystems, and this can be observed irrespectively of national fire-fighting capacities or management tactics (Bowman et al., 2009; Forsyth and Van Wilgen, 2008; Lohman et al., 2007; Westerling et al., 2006a). In addition, the global warming predicted by climate models for the 21<sup>st</sup> century could amplify this trend and threat to most ecosystems at every latitude worldwide (Giannakopoulos et al., 2005; Pachauri and Reisinger, 2007). To provide an estimation of these future climatic changes, four scenarios known as Representative Concentration Pathways (hereafter RCPs) have been developed by climate researchers (Meinshausen et al., 2011; Moss et al., 2008, 2010; van Vuuren et al., 2011) from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). They represent the radiative energy (2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 Watts/m<sup>2</sup>, respectively) gained at the Earth surface in 2100, and they replace the four original families of scenarios (SRES A1, A2, B1, and B2, respectively). Each RCP is used to drive climate model simulations until 2300, planned as part of the World Climate Research Programme's Fifth Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) (Pachauri and Reisinger, 2007; Wu et al., 2013).

Located on a latitudinal gradient at the interface between temperate European and subtropical North-African conditions, the Mediterranean basin, and within the French island of Corsica, has a climate characterized by a seasonal warm and dry climate with a marked summer drought (Pausas, 2004; Sá et al., 2017), making it a fire-prone region (Keeley, 2009; Leys et al., 2014). For the last decades (1973-2019), 2 369 fires larger than 10 ha have occurred in Corsica and 305 063 ha (~67 779 ha.yr<sup>-1</sup>) have been burned (<http://www.promethee.com/>). Corsica is well known for its biodiversity values, partly due to the high number of endemics species (Médail, 2017; Médail and Verlaque, 1997). It is also one of the best preserved Mediterranean forest ecosystems (Médail and Quezel, 1997; Vogiatzakis et al., 2016) but also one of the most susceptible area to climate and disturbance-regime changes in the future like it has happened in the past (Giannakopoulos et al., 2005; Giorgi, 2006; Lestienne et al., 2019b, 2019a; Vogiatzakis et al., 2016).

Several climate-related indexes of fire-danger have been tested for the Mediterranean region among which the Fire Weather Index (Wagner et al., 1987) and its sub-indexes,

which have overall showed their efficiency on current climate conditions (Aguado et al., 2003; Carvalho et al., 2008; Moriondo et al., 2006). However, most of these fire-danger indexes require daily weather forecast data to be computed, which can limit their use for past assessment and future prediction. The Monthly Drought Code (MDC), whose computation is derived from the computation of the Drought Code - a sub-index of the FWI, has also been created first in Canada (Girardin and Wotton, 2009) and recently tested over Corsica (Lestienne et al., 2019a). Its computation uses monthly means of maximum temperature and monthly precipitation, therefore providing an assessment of climate-related fire danger without the constraint of daily data requirement.

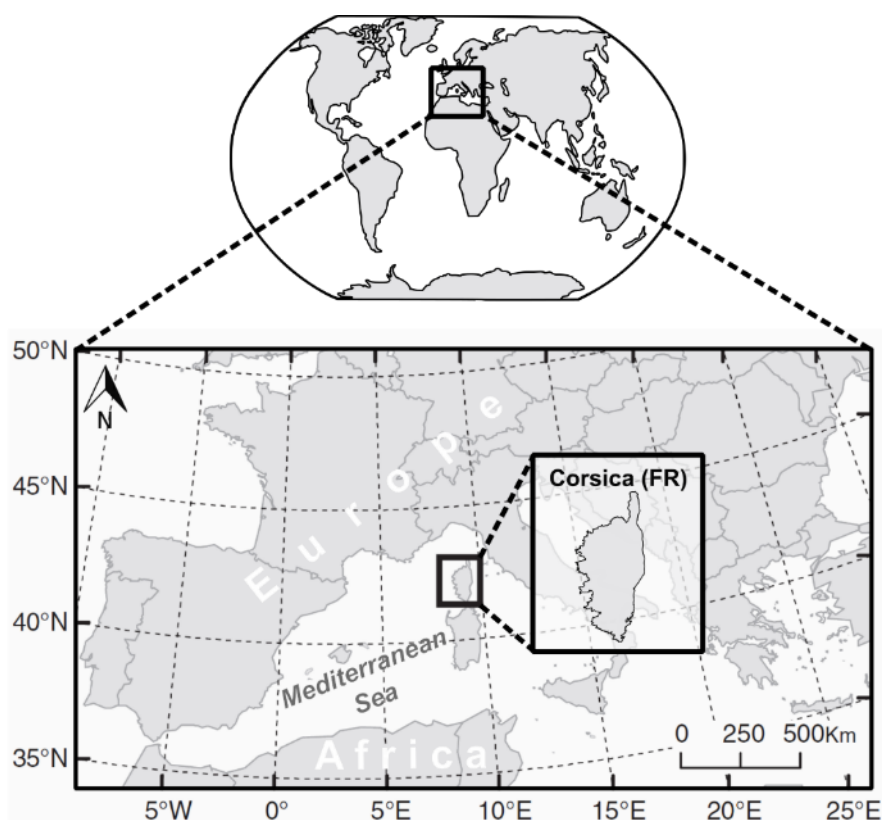
Our study aims first at assessing the future climate-related fire hazard in Corsica for the current century (2020-2100) based on two RCP scenarios and the MDC computation, and secondly at discussing the predicted trends in regards to the longer-term framework encompassing the last 11700 years for which fire-danger trend has previously been assessed (Lestienne et al., 2019a). Values of past fire hazard can be used as historical baselines, therefore providing insights about thresholds and shifts in ecosystems responses related to fire regime changes.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. STUDY AREA

Corsica is a French island located in the western Mediterranean basin, 80km from the Italian coast and 160km from the French coast (**Figure V.1**). In spite of high mountains, there are no glaciers and no permanent snow on the island (Conchon, 1986). During the early Holocene, the vegetation was mainly composed by pinewood (*Pinus sp.*) and Ericaceous species (*Erica sp.*). During the Neolithic (around 6000 years ago), a significant change occurred in land cover with the expansion of oak forests (*Quercus sp.*), which has dominated the island during most of the Holocene thereafter (Lestienne et al., 2019b; Reille, 1992a; Reille et al., 1999). Nowadays, the ecological value of the region, the high population and settlement density on the island

and the abandonment of traditional land use represent important stakes that, combined with climate warming, induce an exponential increase in fire risk (Keeley, 2009; Leys et al., 2014).



*Figure V.1 - Geographical context of Corsica (France).*

## 2.2. CLIMATE DATASETS

Current climate dataset was extracted from ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int/>), which is a daily global atmospheric reanalysis since 1979, continuously updated in real time, with a spatial resolution of approximately 60 x 80 km, Corsica being covered by a total of five pixels (Dee et al., 2011).

Paleoclimate simulations datasets were extracted from simulations provided by HadCM3BL-M1, this model being a variant of the fully complex Hadley Centre climate model HadCM3, usually involved in IPCC assessment reports, and belonging

to the HadCM3 family of climate models (Valdes et al., 2017). Based on orbital forcing parameters and some other prescribed variables for the ocean compartment, this intermediate-complexity model version performed a snapshot equilibrium simulation of the atmospheric compartment per millennium, from which climate normals (monthly means) for main climate variables (*i.e.* air temperature and precipitation used here) are available. We therefore used these datasets of climate normals for the last eleven millennia (centered at 11, 10, ..., 2, and 1 kilo years calibrated Before Present *i.e.* before 1950 – abbreviated thereafter ky), as well as for the control run representative of the pre-industrial period (1750, considered as equivalent to 0 BP). Then, temperature and precipitation anomalies (*i.e.* difference and rate of change for temperature and precipitation, respectively) have been computed for each millennium based on Ramstein et al. (2007). Using an inverse-distance weighting approach on the four closest HadCM3BL-M1 pixels from those covering Corsica, we downscaled these anomalies by applying them to the current period climate normals that we computed from the ERA-Interim dataset to reconstruct past climate for each Holocene millennium at the whole island scale (Hély et al., 2010; Ramstein et al., 2007). For comparisons, insolation values for the entire Holocene have been obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.noaa.gov/>) (Berger and Loutre, 1991).

Future climate datasets are projections from simulations of five CMIP5 coupled models (**Tableau V-1**), and we first compared them to the overall range of historical variability (1979-2016). Two RCPs scenarios have been used: i) RCP4.5, with a peak in greenhouse gas concentrations (660 ppm CO<sub>2</sub> equivalent) around 2040 / 2050, which then stabilizes until 2100. This scenario includes long-term, global emissions greenhouse gases, short-lived species, and land use-land-cover in a global economic framework (Thomson et al., 2011). ii) RCP8.5, the greenhouse gas concentrations will increase all over the century until 1370 ppm (CO<sub>2</sub> equivalent) in 2100. This scenario combines assumptions about high population and relatively slow income growth with modest rates of technological change and energy intensity improvement, leading in the long term to high energy demand and GHG emissions (Riahi et al., 2011).



**Tableau V-1** - Summary of the global climate models used in this study (based on the IPCC Fifth Assessment Report AR5)

	Model	Resolution		References
		Atmospheric	Oceanic	
<b>Past</b>	HadCM3BL-M1	3,75° x 2,5°	3,75° x 2,5°	<i>Valdes et al., 2017</i>
	FGOALS_S2	1,65° x 2,8°	1° x 1°	<i>Bao et al., 2013</i>
	CanESM2	2,8° x 2,8°	1° x 1,4°	<i>Chylek et al., 2011</i>
<b>Future</b>	MIROC_ESM_CHEM	2,8° x 2,8°	1° x 1,4°	<i>Watanabe et al., 2011</i>
	MIROC5	1,4° x 1,4°	0,5° x 1,5°	<i>Watanabe et al., 2010</i>
	MRI_CGM3	1,1° x 1,1°	0,5° x 1°	<i>Yukimoto et al., 2012</i>

### 2.3. CLIMATE FIRE HAZARD ASSESSMENT

The Monthly Drought Code (hereafter MDC, (Girardin and Wotton, 2009) captures the moisture content of deep and compact organic layers. As for the DC, the MDC indicates the effects of seasonal drought on forest fuels and the probability of smouldering in deep duff layers and in large logs but they differ in their computation requirements. DC is part the Fire Weather Index System (FWI) developed by Forestry Canada since 1968 (Stocks et al., 1989). We have showed in a previous study that the DC was efficient to discriminate fire days and no-fire days in Corsica for the period 1979-2016 and that the MDC is an efficient tool to reconstruct the Holocene climate-related fire hazard (Lestienne et al., 2019a). The great advantage of the DC and the MDC is that they only need precipitation and temperature data (Wagner et al., 1987). Moreover, while the DC needs daily data, the MDC has been directly created to be computed from monthly means of precipitation and maximum temperatures, which makes it very powerful for simulated past and future datasets (Lestienne et al., 2019a). The MDC has been computed on each millennium for the entire Holocene (0 to 11 K years cal. BP) in order to compare with the current period fire signal. A threshold at 280 units have been defined to characterize extreme drought and high fire danger for Boreal forests (Girardin and Wotton, 2009). In Corsica, this threshold is about 300 units (Lestienne et al., 2019a).

## 2.4. FIRE SEASON

Based on historical analysis of MDC values, and according to the method originally developed by Hély et al. (2010) for the DC and previously adapted to the MDC (Lestienne et al., 2019a), we used the MDC threshold value of 300 to calculate the Fire Season Length (FSL) for the current period, the future decades until 2100 and for each of the last eleven millennia. Basically, for all months with MDC values above the threshold, we considered the full month length (30 or 31 days) as part of the FSL. To define the starting (and ending) month of the FSL and to add the related number of days (*i.e.* <30 or 31 for each month), we used a basic linear interpolation between such month, reporting a MDC value lower than the 300-unit MDC, and the following (preceeding) month with above-threshold MDC value (Lestienne et al., 2019a). On the expected starting (ending) month, we associated the lower-than-threshold MDC value to the first (last) day and the above-threshold value to the last (first) day of this month to perform the computation.

## 3. RESULTS

### 3.1. FUTURE PREDICTIONS

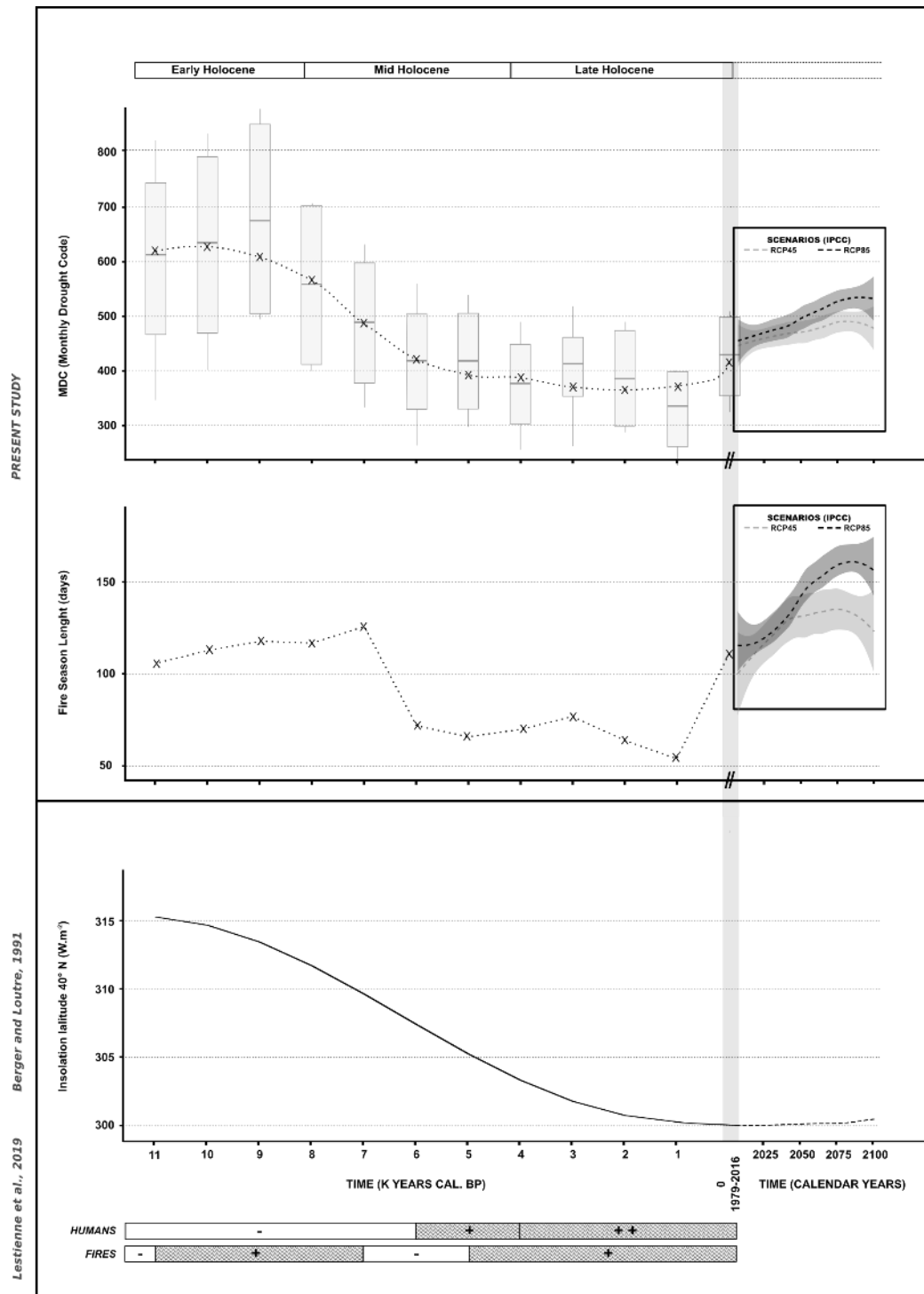
The results showed that 7.5% and up to 21% increase in MDC will occur over the next decades based on RCP4.5 and RCP8.5, respectively (**Figure V.2**). The Fire Season Length will have a more important increasing trend (25%, 35 days for RCP4.5 and 32%, 51 days for RCP8.5). It is worth noting that after 2040, the future highest FSL values predicted from both RCP scenarios will exceed the Holocene maximum value reconstructed. Indeed, after 2040, FSL will stabilize around 130 days (> 4 full months) for the RCP4.5 scenario, while it will exceed 150 days (> 5 full months) with the RCP8.5 scenario.

For comparison, the reconstruction of Holocene climate-related fire hazard, with both the MDC and FSL, has highlighted five periods since 11000 years BP (**Figure V.2**). From 11 to 9 K years cal. BP the fire hazard has been high, with MDC and FSL values

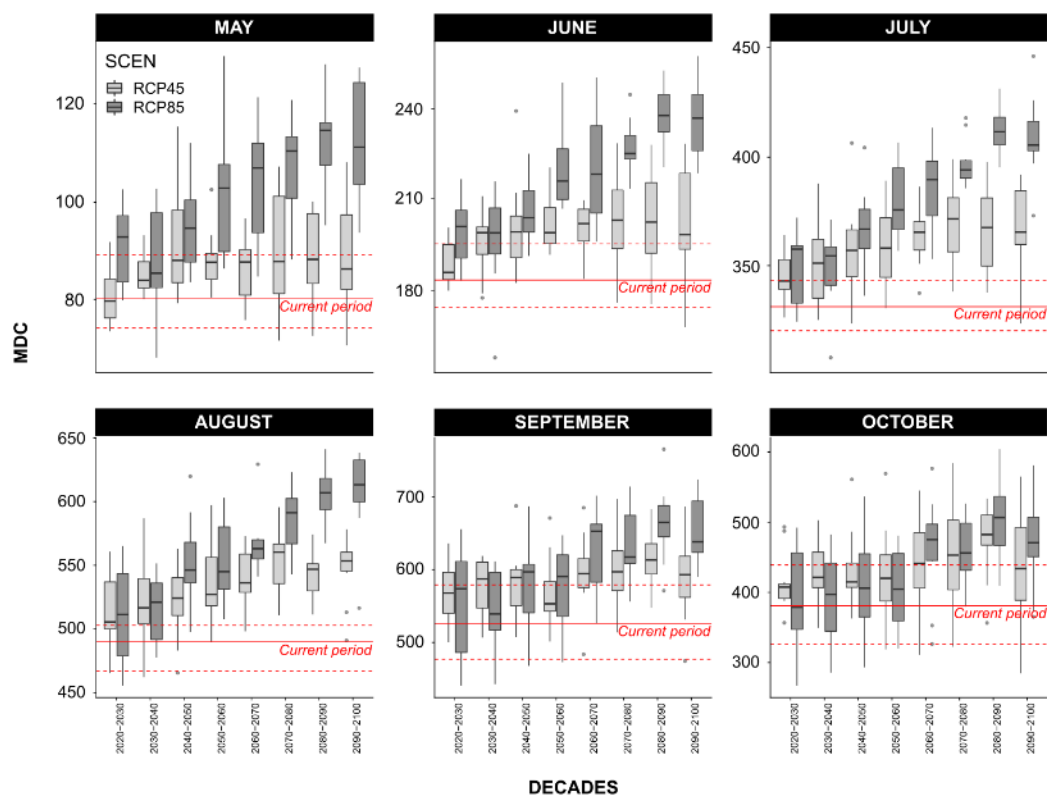
above 600 units and 100 days, respectively. Afterwards, i.e. between 9 and 7 K years cal. BP, the Fire Season Length values have remained high with a peak of 126 days at 9 K years cal. BP, while during this second period MDC values progressively decreased below 500 units. After 7 K years cal. BP, Fire Season Length fell below 80 days, while MDC continued to decrease until 5 K years cal. BP. After 5 K years cal. BP, a low fire hazard lasted 4 millennia, characterized by minima values for both MDC (below 400 units) and FSL (between 54 et 77 days). Finally, between 1 and 0 K year cal. BP the fire hazard switched back toward increasing trend due to both a slight increase in the MDC values, passing above 400 units, and a sharp increase in FSL above 100 days, attesting change in fire-related climate-conditions.

### 3.2. INTRA-SEASON VARIABILITY

The MDC calculations for each month between May and October from 2020 to 2100 (**Figure V.3**) highlighted that the future monthly fire hazard will be higher than the current one whatever the RCP scenario. However, beyond this general increase, inter-monthly variability can be observed. For the scenario RCP8.5, the increase in MDC over the course of fire season will be progressive from 2020 until 2100, except for the late season months (September and October) that will show an increase only after 2060. For months of May, June, July and August, the MDC will be higher than current period range of variability from 2040, up to 1.5x higher for June and August. Both RCP scenarios produce similar fire hazard until 2040 and then they move away from each other, in particular for the early to mid-fire season (May and August). For the scenario RCP4.5, the increase in fire hazard is not linear. A similar increase as for the RCP8.5 can be observed until 2040 for the months of May and June, until 2050 for the months of July and August, and until 2060 for the months of September and October. Then, MDC values remain stable until 2100 for all months. For the scenario RCP4.5, the predicted MDC values for the months of May and October will stay in the range of variability of the current MDC values, while predicted MDC values for the months of June and September will get out from the range of present variability from 2050, while for the months of July and August it will get out one decade earlier.



**Figure V.2** - MDC and FSL changes during the Holocene and future decades. MDC computation was performed from May to October, and the Fire-Season length subsequently estimated based on the 300-unit MDC threshold (see section 2.3). References to fires and human activities at the figure's bottom come from a previous study based on microcharcoal-fire and *Sporormiella*-pasture paleoreconstructions from the Bastani Lake in Corsica (Lestienne et al. 2019). Past insolation come from Berger and Loutre (1991).



*Figure V.3 - MDC distribution for the next decades in terms of month and the IPCC CMIP5 RCP scenarios. Red curves represent the 1979-2016 distribution, the plain curve being the median and the dotted curves being the first and third quartiles values.*

## 4. DISCUSSION

### 4.1. FIRE HAZARD CHANGES FOR THE NEXT DECADES

We showed that the MDC and the Fire Season Length for both RCP scenarios will increase until *c.a.* 2050. Then, these increases will slow down or stabilize with the RCP4.5 scenario, while they will continue their ascents with the RCP8.5 scenario.

Such overall trends agree with those found from previous studies that used the FWI or one of its sub-indexes to analyse future changes in fire hazard in the Mediterranean basin. For instance, Moriondo et al. (2006), dealing with future trend in Fire Season Length in the Mediterranean basin but based on previous generation of IPCC scenarios

showed that FSL will increase by *c.a.* 40 and *c.a.* 32 days for the scenario SRES A2 (close to RCP8.5) and the scenario SRES B2 (no RCP equivalent), respectively. These FSL values are in line with ours (from +24 days or 25% to +48 days or 50% for RCP4.5 and RCP8.5, respectively) despite different IPCC scenario generation, different current period ranges (1961-1990 versus 1979-2016 for this study) and different temporal synthesis (only one period for the future (2071 – 2100) for their study versus all decades until 2100 in this study). Their assessment represents the mean of six Mediterranean countries (i.e. Portugal, Spain, Greece, Italy, France and Balkan), while ours focus on Corsica, at the center of the Mediterranean region they covered. Similarly, the review of Giorgi and Lionello (2008), based on an ensemble of global and regional climate change simulations, showed that the next decades will be characterized by a decrease in precipitation and an increase in temperature, and that these changes will mostly occur in summer. It is in line with our results showing a drought increase over the next decades, especially in summer (**Figure V.3**, Annexe B). The causes for this large summer drying signal have been previously investigated by Rowell and Jones (2006), who examined four possible and non-exclusive mechanisms: i) the low spring soil moisture conditions leading to reduced summer convection; ii) the large land-sea contrast in warming condition leading to reduced relative humidity and precipitation over the continent; iii) the positive summer soil moisture precipitation feedback; iv) the remote influences (e.g. descending motions induced by the strengthening of the Asian monsoon). According to these authors, these changes will be similar until 2050 and will depend of the RCP scenario, and so of the politics and economics choices, after 2050 (Cuttelod et al., 2009; Pachauri and Reisinger, 2007; Planton et al., 2012). Such changes have been reported in most projections from both global and regional models and most IPCC scenarios (Giorgi et al., 2001; Giorgi and Francisco, 2000; Kittel et al., 1997) (e.g. Giorgi et al., 1992; Jones et al., 1997). More recently, Faggian (2018) using the same RCP scenarios as ours showed that in Italy the temperature will increase in the next decades in both RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, without accompanying increase in rainfall amount, which will lead to a much drier forest and make fire ignition easier (and fire control more difficult). This increasing trend in fire hazard has been estimated using the FWI index, which requires more inputs (i.e. wind speed and relative humidity) than the DC or the MDC. As from aforementioned studies, there are slight differences between our results and those from Faggian (2018), namely the current period range (1971-2000

versus 1979-2016 here) and the future period range (only the 2021-2050 period versus all decades until 2100).

#### 4.2. WILL THE FUTURE FIRE HAZARD BE SIMILAR TO THE PAST FIRE REGIMES?

By comparing our future predictions with the Holocene values, we can see that the Fire Season Length will exceed the maximum Holocene values from 2040, while MDC will reach values never observed since 6 K years cal. BP in 2100. From these observations, we can expect an increase in fire occurrences in the next decades, but the climatic conditions and the vegetation will differ in the future fire-prone periods as compared to the early Holocene period. Indeed, the current insolation is lower than in the early Holocene (11 to 7 k years cal. BP), which corresponded to the maximum Holocene insolation (Berger and Loutre, 1991), especially for the months of June, July and August at 45°N latitude (Hély et al., 2010; Renssen et al., 2012). This high insolation in early Holocene induced a strong seasonality, with the highest temperature and lowest precipitation in summer, and inversely for winter as showed by Dormoy et al. (2009) from marine pollen records. Here we showed that the fire season length will increase in the future, due to both the increase in temperature as a response of increasing concentrations in Greenhouse Gas and the decrease in precipitation as a response of atmospheric dynamics over the Mediterranean region that will occur for every month (Appendix B), with most aridity in summer months. This difference in seasonality origin between early Holocene with high insolation and the 21<sup>st</sup> century with low insolation but high concentrations of Greenhouse Gas could explain the differences between the early-Holocene period and the future predictions in term of MDC and Fire Season Length. Indeed, the MDC calculation needs monthly maximal temperatures and monthly precipitations data (Girardin and Wotton, 2009). Because the early Holocene summer conditions was warmer and dryer, the MDC was high, but the strong seasonality with cooler and wetter conditions in both spring and autumn induced relatively short Fire Season Length. In the future, the climatic conditions in summer will not reach the maximal Holocene values, but the global aridification occurring for every month will extend the Fire Season Length much longer. Contrary

to the early Holocene when insolation was the main climate driver, the global increase in aridity is now mainly due to the strong increase of greenhouse gases emissions in the context of global change (Meinshausen et al., 2011; Pachauri and Reisinger, 2007; Riahi et al., 2011; Thomson et al., 2011).

In addition, we have to consider that fires have not always been the result of an arid period. Indeed, while dry and warm climate promoted fires between 11 and 7 k years cal. BP, humans have been the main driver after 5 k years cal. BP with slash-and-burn activities for pastoral activities (Lestienne et al., 2019b; Leys et al., 2014). Beside this, differences in vegetation composition must also be taken into account. Indeed, the early Holocene vegetation was mostly composed by pinewoods with low diversity (Reille, 1992a; Reille et al., 1999), while the current vegetation is more diversified, with grasslands and low shrubby formations of *Alnus sp.*, *Juniperus sp.* and *Berberis sp.* at high elevation, and with oakwoods and sclerophyll vegetation in lower stages (Gauthier et al., 1983; Reille et al., 1997, 1999).

In the early Holocene, the dry and warm climatic conditions have promoted fires, which have opened the landscape and promoted more diversified vegetation with the development of shrublands despite pinewoods (Beffa et al., 2016; Lestienne et al., 2019b). Nowadays, fire ignitions are mostly due to humans activities (accidental or intentional ignitions) (Curt et al., 2016). Associated to the warmer and dryer climate, these conditions will strongly contribute to increase the wildfires frequencies and intensities in the Mediterranean region (Batllori et al., 2013; Giannakopoulos et al., 2005; Lahaye et al., 2018b; Lestienne et al., 2019b; Mouillot et al., 2002; Pausas, 2004). In term of burned area, the increase would reach 66 to 140% depending the RCP scenario between nowadays and the end of the 21st century (Amatulli et al., 2013).



### 4.3. ADVANTAGES AND LIMITS OF THE METHOD

The MDC is an efficient and a really simple index to assess the fire danger (Bürger, 2013; Lestienne et al., 2019a). Moreover, the few inputs needed (only precipitation and maximum temperature) makes it adaptable for a wide temporal range (Girardin and Wotton, 2009; Wagner et al., 1987).

However, the quality of the MDC signal (and so the quality of the Fire Season Length estimation too) strongly depends on the climate models used. Five climate models, among the most used (Chylek et al., 2011; Watanabe et al., 2010, 2011; YiMin et al., 2018), have been used for our future simulations, giving confidence to our results (Ahlström et al., 2012; Shiogama et al., 2007). Moreover, this confidence is reinforced by the strong similarities between our results and those from other studies (Cuttelod et al., 2009; Giorgi et al., 1992; Pachauri and Reisinger, 2007; Planton et al., 2012). However, only one model (namely HadCM3BL-M1) has been used for the past periods due to the lack of models that can efficiently simulate the overall Holocene climate dynamics, even though snapshot simulations. However, Hély et al. (2010) showed that for the mid-Holocene period (i.e. 6000 years BP), the climate reconstructed with this model version was not significantly different from those reconstructed from six other global climate models, such comparison illustrating the effectiveness of the climate model used here.

## 5. CONCLUSION

Our results highlighted the increase in fire hazard and fire season length for the next decades. Even if the MDC will not reach the maximum Holocene values, the Fire Season Length will reach (for RCP4.5) or even exceed (for RCP8.5) the maximum Holocene length from 2050. These increases are mainly attributed to the global warming and the increase in aridity that goes with in the Mediterranean region.

Early Holocene fires have been driven by climate due to high solar insolation, whereas from 6 K years cal. BP, fires have been driven by human activities. Currently, and for the first time in the Holocene, we are confronted to an increase in both drought and

human influences, and this combination will probably promote frequent and extreme fires. Such increase, associated with the increase in wildland/urban interface due to the urban sprawl could threaten the population, houses and structures. Moreover, it could also lead to a biodiversity loss. In France, fire policy established after the devastating wildfires of 1990 has been very effective under normal weather conditions. However, this capacity could be undermined under more extreme weather condition, and the devastating fires of 2003, 2016 or 2019 ([www.promethee.com](http://www.promethee.com)) have already showed that our capacity to control fires is limited.

For the next 30 years, the game seems to be played already because both studied RCP scenarios showed the same fire hazard trends. However, our current policies will influence the climate evolution at a longer scale and we need to reconsider our politic choices to avoid catastrophic consequences in term of ecology and/or economy (ex: extremes wildfires close to the cities, biodiversity losses, etc.).

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

This research was funded by by Région Bourgogne Franche-Comté through Chrono-environnement laboratory, the MSHE Ledoux and the projects ONOMAD, QMedFire and ENVILEG led by BV. This study was also supported by the CNRS PaléoMEx-MISTRALS program. This study is part of the PAGES-GPWG activities.

## ANNEXES

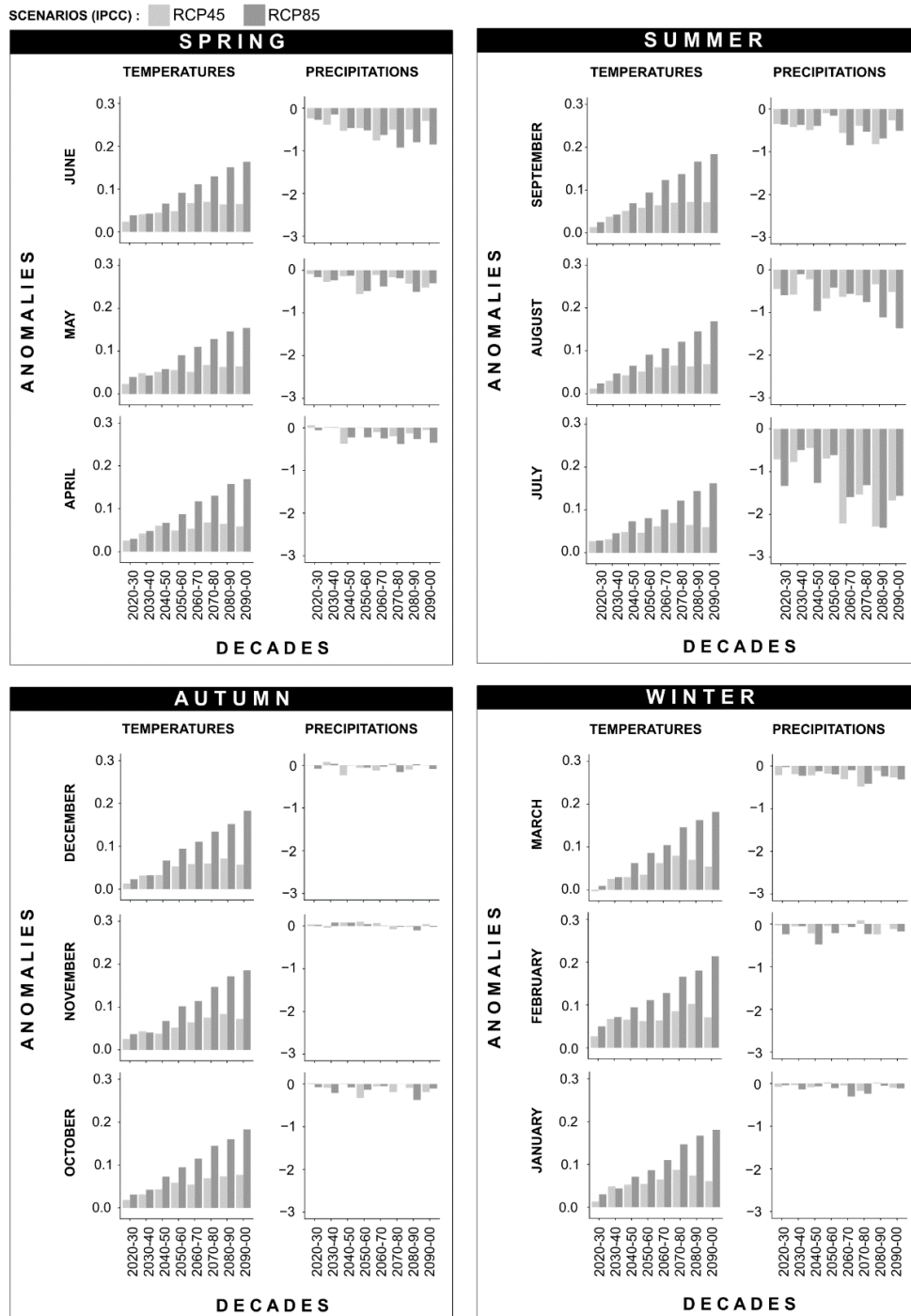
*Appendix A*

MDC and FSL changes during the Holocene and prediction for the future. Considered period is from May to October.

Period	K years cal. BP	Scenario	Mean MDC		Fire Season		
			<i>During summer</i>	<i>Starting</i>	<i>Ending month</i>	<i>Fire Season length</i>	
Future (decades)	2090-00	RCP4.5	456	May	November	130	
		RCP8.5	519			158	
	2080-90	RCP4.5	471	May	October	140	
		RCP8.5	518		November	164	
	2070-80	RCP4.5	461	May	October	137	
		RCP8.5	499		155		
	2060-70	RCP4.5	459	May	October	134	
		RCP8.5	490		149		
	2050-60	RCP4.5	446	May	October	133	
		RCP8.5	466		148		
	2040-50	RCP4.5	450	June	October	122	
		RCP8.5	450		128		
	2030-40	RCP4.5	438	June	October	118	
		RCP8.5	430		120		
	2020-30	RCP4.5	424	June	October	105	
		RCP8.5	429		113		
	Holocene (millenniums)	Present (1979 – 2018)		419	June	October	111
		1		314	July	September	54
2			379	July	September	64	
3			394	July	October	77	
4			365	July	October	70	
5			412	July	October	66	
6			406	July	October	72	
7			482	June	October	126	
8			556	June	October	117	
9			685	June	October	118	
10			628	June	October	113	
11			598	June	October	106	

## Appendix B

Mean precipitation and temperature anomalies for the next century (2020-2100) calculated for two IPCC CMIP5 scenarios (RCP45 and RCP85) from five IPCC CMIP5 climatic models: FGOALS\_S20, CanESM2, MIROC\_ESM\_CHEM, MIROC5, MRI\_CGM3 (Knutti and Sedláček, 2013; Lau et al., 2013; Vera et al., 2006; Wu et al., 2013) in function of the season and the month.





---

---

**Chapitre VI.**  
**DISCUSSION GENERALE & CONCLUSION**

---

---



Les travaux menés au cours de cette thèse ont permis de reconstruire l'évolution du système climat-feux-végétation-Homme au cours de l'Holocène, et mieux comprendre les interactions liant ces 4 composantes. Ces résultats ont pu être obtenus grâce à i) l'utilisation de nombreux proxies paléocologiques adaptés à chaque composante du système : les charbons nous informent sur les feux, les grains de pollen sur la végétation et les spores de champignons (en particulier *Sporormiella sp.*) sur les activités humaines et le pâturage notamment (Chapitre III) ; ii) les observations actuelles de feux *via* la base de données Prométhée et du climat *via* la base de données ERA-interim, utilisées comme base de comparaison, iii) les simulations numériques nous informant sur les climats passés et futurs (Chapitre IV et Chapitre V), et iv) l'utilisation de deux variables, l'aléa et la longueur de saison de feu, pour estimer le danger de départ de feu, contraint exclusivement par le climat et que nous avons estimé pour les différentes périodes.

La continuité temporelle de chaque étude, d'abord centrée sur le passé (Chapitre III), puis sur le passé et le présent (Chapitre IV), et enfin sur le présent et le futur (Chapitre V) nous permet d'obtenir une vue d'ensemble depuis 11700 ans cal. BP et ce jusqu'à 2100, ainsi que de discuter de nos résultats dans un cadre réaliste malgré les difficultés liées aux données disponibles ou aux différences d'échelles (temporelle et spatiales).

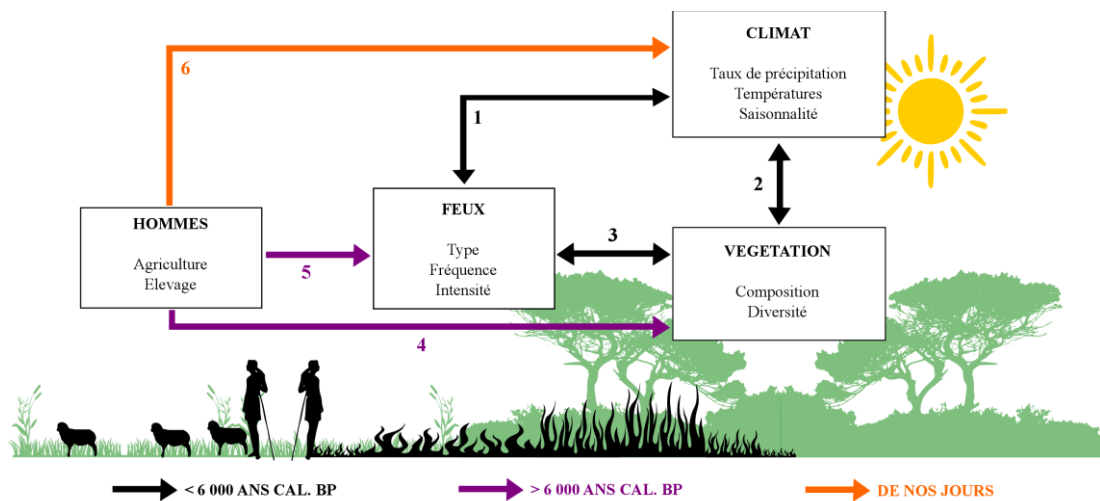
Les résultats obtenus dans cette thèse, en plus de nous informer sur l'origine climatique ou anthropique des feux, nous ont permis de comprendre le lien entre la biodiversité végétale et les perturbations (qu'elles soient anthropiques ou non), ou encore de replacer les projections futures, possiblement alarmistes, dans un cadre spatio-temporel contraint intégrant quasiment les 12000 dernières années.

Enfin, l'amélioration de notre compréhension du système environnemental méditerranéen symbolisé dans cette thèse par la Corse a été rendu possible grâce à l'amélioration d'outils et de mesures (morphologie des charbons) et grâce au détournement d'indices développés sous d'autres latitudes mais tout à fait à même d'être appliqués à un environnement méditerranéen.

## 1. DES FEUX CLIMATIQUES AUX FEUX ANTHROPIQUES

Au cours de l'Holocène, l'Homme s'est imposé comme un acteur majeur ayant un impact sur le système climat-feux-végétation déjà en place en Méditerranée, et plus généralement dans le monde (Colombaroli et al., 2007, 2008; Moriondo et al., 2006; Vannièrre et al., 2008, 2016).

Ces travaux de thèse ont permis de mettre en évidence les grands changements ayant eu lieu au sein de ce système (présenté dans la partie 1.2 de l'introduction) au cours de l'Holocène (**Figure VI.1**).



**Figure VI.1** - Schéma synthétique résumant les interactions réciproques au sein du système climat-feu-végétation-Homme. Le type de feu réfère aux feux de surface (se propageant au sol) ou de couronne (se propageant jusqu'à la cime des arbres).

### 1.1. IL Y A DES FEUX EN CORSE DEPUIS AU MOINS 11 500 ANS

Nos résultats ont pu mettre en évidence l'occurrence « naturelle » du feu en Corse depuis au moins 11500 ans (**Figure VI.3**). Ces feux ont été enregistrés dans 3 lacs différents : le lac Bastani (Lestienne et al., 2019b), le lac Nino (Lestienne et al., 2019a), et le lac Creno (Leys et al., 2013) *via* les charbons de bois présents dans leurs sédiments.



Deux périodes principales communes aux 3 lacs se dessinent durant lesquelles le régime de feu était particulièrement soutenu. La première période est très similaire pour les trois lacs, alors que la seconde présente un peu plus de variations, tant sur son début que sur l'âge des épisodes de feux.

La première période couvre le début de l'Holocène (11500 à 7000 ans cal. BP). Cette période est marquée par une recolonisation des arbres (Reille, 1992a; Reille et al., 1999), en particulier *Pinus sp.* puis par le développement d'un sous-bois de bruyères composé principalement par *Erica sp.*, augmentant ainsi non seulement la quantité de combustible disponible proche du sol, mais aussi la connectivité horizontale au sein des peuplements et verticale vers la cime des arbres, ce qui a pu favoriser les feux de couronne (Albini et Reinhardt, 1995; Curt et al., 2013). A cela s'ajoute un climat estival particulièrement chaud et sec caractéristique du début de l'Holocène (Magny et al., 2007, 2013; Vannièrè et al., 2011), et correspondant alors aux conditions optimales pour l'ignition et la propagation des feux de forêts (Albini et Reinhardt, 1995; Rothermel, 1983). La morphologie des charbons de bois (petits et géométriques) observés dans les sédiments du lac Bastani, peut s'expliquer de plusieurs manières non exclusives : i) les charbons ont pu être remaniés et donc fragmentés (*ex.* Ali et al., 2009; Vannièrè et al., 2003), ii) le signal capturé provient d'une longue distance et seuls les petits charbons ont une masse suffisamment légère pour être transportés jusqu'à ce lac éloigné (*ex.* Clark et Royall, 1995), et iii) le combustible brûlé était principalement ligneux favorisant ainsi plutôt une forme géométrique cubique (*ex.* Umbanhowar et Mcgrath, 1998). Cette tendance est observée pour les trois lacs, mais aussi dans d'autres régions du Bassin Méditerranéen comme en Italie (*ex.* Colombaroli et al., 2007) ou en Espagne (*e.g.* Carrión et Van Geel, 1999), indiquant que nous sommes face à une tendance globale qui touche toute la région Méditerranéenne. Aujourd'hui, les pinèdes engendrent principalement des feux de couronnes (Pausas et al., 2009b), et nous pouvons donc penser que la forme des charbons de cette période du début de l'Holocène, dominée par les pins, reflète une majorité de combustibles ligneux.

La seconde période démarre entre 6000 et 5000 ans cal. BP suivant les lacs (6000 pour Creno, 5500 pour Nino et 5000 pour Bastani) et s'étend jusqu'à nos jours. Elle succède à une période avec très peu de feux, qui a duré environ un millénaire, et durant laquelle les chênaies (composées principalement de *Q. ilex* et *Q. pubescens*) ont pu se

développer, les chênes étant meilleurs compétiteurs que les pins dans un milieu sans perturbation (Carcaillet et al., 1997; Colombaroli et al., 2008, 2009; Reille, 1992a). Cette augmentation des occurrences de feux, visibles par les pics de charbons, est presque parfaitement synchrone avec l'augmentation de *Sporormiella sp.* observée à Bastani, qui est probablement dû au développement du pâturage dans la vallée. Cette augmentation pourrait refléter l'augmentation de la présence de l'Homme qui a transformé son environnement, coupant ou brûlant les forêts pour en faire des terres de cultures ou d'élevages (Janny et Costa, 2004), l'utilisation du feu par les populations humaines dès le Néolithique étant clairement attestée (Carcaillet, 1998; Clark et al., 1989; Mouillot et al., 2008; Tinner et al., 2005; Vannièrre et al., 2008; Vannièrre et Martineau, 2005). Les changements observés dans la morphologie des charbons de bois qui sont alors devenus plus grands, allongés et non dentés pourraient refléter des combustibles plutôt herbacés et un signal plus local (Enache et Cumming, 2006; Jensen et al., 2007; Mustaphi et Pisaric, 2014; Umbanhowar et Mcgrath, 1998) induit par l'augmentation des activités humaines (ex : maintenance de milieux ouverts). Sur les derniers siècles, les charbons sont devenus plus petits, plus géométriques et moins allongés pouvant refléter des combustibles plutôt ligneux et un signal moins local (Enache et Cumming, 2006; Jensen et al., 2007; Mustaphi et Pisaric, 2014; Umbanhowar et Mcgrath, 1998). Cette période est caractérisée par une ouverture du milieu et par l'augmentation du signal incendie dans les 3 lacs, notamment dû aux activités humaines. Cette observation reflète une tendance globale pour la Corse, mais aussi pour le reste du monde (Blarquez et al., 2015; D. Syphard et al., 2007; Li et al., 2017; Vannièrre et al., 2016). De plus, le changement de morphologie des charbons observé à 800 ans cal. BP a également été observé en Italie (Vannièrre et al., 2008). Les auteurs ont attribué ce changement à un processus d'érosion mis en évidence par les changements de taux d'accumulations depuis 1800 ans cal. BP, et qui serait lié à des changements d'utilisations des sols dans le cadre de l'agriculture (Bajard et al., 2017; Giguet-Covex et al., 2014). Toutefois, pour Bastani au moins, nous savons que l'érosion est extrêmement limitée et les apports terrigènes sont probablement plus dus à des poussières venues d'Afrique (P. Sabatier, communication personnelle). A partir de ces observations, nous pouvons penser que les activités humaines ont pu contribuer significativement à l'augmentation de la fréquence des feux, et aux changements de morphotypes observés dans les charbons qui reflètent un changement de type de feu et/ou de combustible.

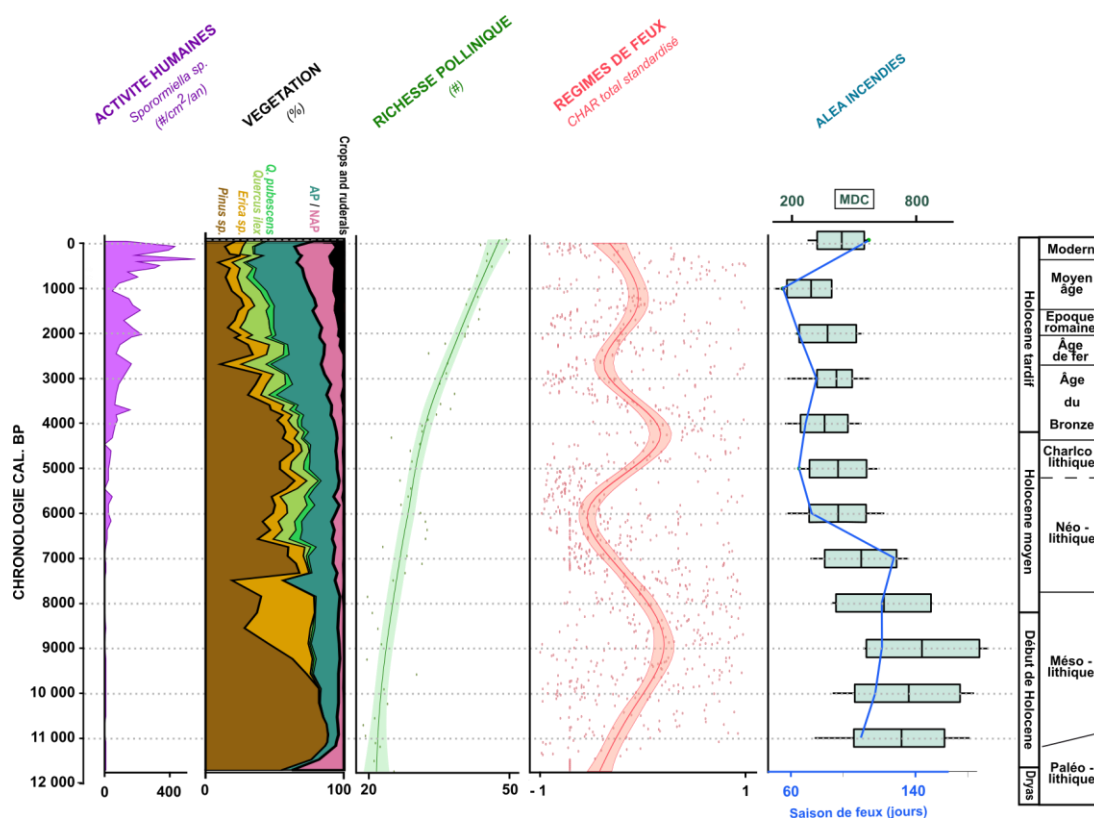


Figure VI.2 – Synthèse des principaux résultats obtenus en terme d'évolution de la végétation, de l'activité humaine, des feux, et du hasard de feux pour l'Holocène

## 1.2. COMMENT DISTINGUER LES FEUX CLIMATIQUES DES FEUX ANTHROPIQUES ?

Si les feux ont toujours été présents en Corse, leur origine a pourtant changé, et nous sommes passés de feux contrôlés par le climat, à des feux principalement induits par l'Homme et ses activités. Ainsi, l'utilisation de l'indice mensuel de sécheresse, ou « MDC », en plus des données paléoécologiques déjà étudiées, nous a permis de discriminer les feux climatiques des feux anthropiques (**Figure VI.3**).

Lors de la première période de forte activité de feux (11500 – 7000 ans cal. BP) décrite précédemment, le calcul du MDC a produit des valeurs très élevées (les plus hautes de tout l'Holocène), soulignant alors l'aridité de cette période. Ces observations sont en adéquation avec les conditions estivales arides décrites en Toscane (Italie) par

Samartin et al. (2017) sur la base d'études de chironomes. De plus, la grande amplitude de nos valeurs (**Figure IV.4**), associée aux anomalies de précipitations et températures (Chapitre IV, Appendix D) illustre bien la forte saisonnalité due à l'augmentation de l'insolation (Magny et al., 2007; Samartin et al., 2017). Ces résultats sont en adéquation avec les autres études menées en Méditerranée et en Europe qui décrivent les conditions climatiques chaudes et sèches du début de l'Holocène (Drescher-Schneider et al., 2007; Rossignol-Strick et Paterne, 1999; Vannièrre et al., 2011) et confirment notre hypothèse selon laquelle le climat et l'augmentation de la quantité de combustible pouvaient expliquer la forte occurrence de feux entre 11500 et 7000 ans cal. BP (Reille et al., 1997, 1999). Nous sommes donc sur cette période, en présence d'un forçage régional, ce qui explique la forte similarité du signal de feu entre les lacs de Bastani et de Nino avec des pics (par exemple vers 9000 et 8000 ans cal. BP) et des creux (par exemple vers 10000 ans cal. BP) synchrones. Ces similarités sont moins marquées avec le lac Creno, probablement en raison du faible signal feu enregistré dans ce lac (Leys et al., 2013).

La période qui suit (après 7000 ans cal. BP) est caractérisée par une forte diminution de la fréquence des feux (Lestienne et al., 2019b; Leys et al., 2014), mais également par un changement de végétation avec la diminution des pins et de la bruyère au profit des chênes (Reille et al., 1997, 1999). Ces changements de composition végétale sont synchrones avec la diminution de l'aléa incendies (estimé par le MDC) et le raccourcissement de la longueur de la saison de feux (**Figure IV.4**) calculés indépendamment de l'information pollinique, mais probablement en lien avec les conditions printanières plus humides (Chapitre IV, Appendix D). Ce radoucissement du climat après 7000 ans cal. BP est observé dans plusieurs autres études (Colombaroli et al., 2009; Leys et al., 2014; Reille et al., 1999) mais nos résultats permettent de mettre en lumière non seulement le printemps comme étant la saison responsable du changement, mais aussi l'impressionnante rapidité de ce changement climatique entre 7000 et 6000 ans cal. BP et donc d'attribuer ces changements de végétations et de feux au climat. La stabilité du signal incendie, de la végétation et du climat (MDC et longueur de saison de feu) qui suit et qui s'étend jusqu'à environ 6000 - 5000 ans cal. BP suppose que l'écosystème Corse avait atteint un nouvel équilibre, adapté à ces conditions plus humides.

Pendant les millénaires qui ont suivi, ni le MDC, ni la longueur de saison de feux n'ont augmenté. Pourtant, nous sommes confrontés à une augmentation significative du signal de feux reconstruit grâce aux charbons à partir de 6000 ans cal. BP pour Creno, 5500 pour Nino et 5000 pour Bastani. Au même moment, l'influx de *Sporormiella sp.* à Bastani augmente, indiquant la présence d'herbivores autour du lac. La fréquentation du lac par les éleveurs installés plus bas dans la vallée semble être l'explication la plus plausible. Ainsi, nous pouvons penser que les feux sont associés aux changements d'utilisation des terres (et à la déforestation associée) par les Hommes (Janny et Costa, 2004). Nos observations sont en accords avec les études archéologiques menées en Corse et qui identifient cette période du Chalcolithique comme une période de croissance démographique (Morelli and Francalacci, 2000b). Cette augmentation des feux a entraîné une réduction de la proportion d'arbres, surtout à partir de 3000 ans cal. BP comme nous l'avons vu dans la première partie de cette discussion ainsi que dans le Chapitre III. Cette ouverture du milieu avait déjà été observée en Corse (Reille et al., 1999), mais aussi dans d'autres régions du Bassin Méditerranéen comme en Sardaigne (Beffa et al., 2016) ou en Espagne (Pausas, 2004). L'augmentation toujours plus marquée des marqueurs d'activités humaines comme le pollen de plantes cultivées ou les spores de *Sporormiella sp.* mis en évidence durant la même période dans nos résultats, est en accord avec d'autres études (Beffa et al., 2016; Colombaroli et Tinner, 2013; Vannièrre et al., 2008). Nous pouvons donc de manière quasi certaine attribuer l'ouverture du milieu et l'augmentation des feux aux activités humaines, également attestés dans d'autres îles Méditerranéennes comme la Sardaigne (Beffa et al., 2016), la Sicile (Tinner et al., 2009) ou Majorque (Bujarhs et al., 1994). La stabilité du MDC et de la longueur de saisons de feux à des valeurs relativement faibles (Chapitre IV) sont également des arguments soulignant que l'origine des feux est passée de climatique à anthropique autour de 5000 ans cal. BP.

## 2. L'HOMME ET LE FEU SONT LES PRINCIPAUX FACTEURS DE L'IMPORTANT BIODIVERSITE VEGETALE EN CORSE

La Corse est bien connue pour son importante biodiversité végétale et pour son fort taux d'endémisme (Médail, 2017; Médail et Verlaque, 1997), faisant de l'île l'un des écosystèmes Méditerranéens les mieux préservés (Médail et Quezel, 1997; Vogiatzakis et al., 2016). Malgré tout, la Corse a subi les impacts du feu et de l'Homme qui ont façonné le paysage.

Ce travail de thèse a notamment pu souligner les changements de végétation en Corse au cours de l'Holocène (**Figure VI.3**), passant d'une domination du pin entre 11500 et 9500 ans cal. BP, au développement d'un sous-bois de bruyère jusqu'à 7500 ans

cal. BP qui laisse ensuite place aux chênes qui coloniseront l'île puis resteront relativement stables à partir de 6500 ans cal. BP. Puis, à partir de 5000 ans cal. BP environ, et en particulier au cours des 1000 dernières années, le milieu s'ouvre et de plus en plus d'espèces cultivées font leurs apparitions (Reille, 1992a; Reille et al., 1999).

Cependant, cette diversité végétale Holocène est difficile à apprécier. En effet, la représentativité de la biodiversité végétale par le pollen est controversée, de par la production et la dispersion des grains de pollen qui varient d'une espèce à l'autre (Goring et al., 2013; Odgaard, 2001). Néanmoins, la palynologie reste encore aujourd'hui la seule méthode pour étudier ces dynamiques passées et plusieurs auteurs s'accordent à dire que la richesse palynologique est un bon indicateur de la richesse végétale (Birks et al., 2016) et qu'il s'agit d'une méthode fiable pour mesurer les changements de biodiversité sur le long terme (*ex.* Colombaroli et Tinner 2013). Il s'agit donc dans cette partie de la discussion, d'interpréter nos résultats, mais avec prudence.

Nos résultats ont pu mettre en évidence le lien étroit existant entre l'Homme, le feu, et la diversité végétale Corse. La **Figure VI.3** synthétise ainsi l'évolution de la richesse palynologique au regard des données de végétation, de feux et d'activités humaines au cours de l'Holocène. Dans cette seconde partie de discussion, nous tenterons de comprendre comment cette biodiversité s'est mise en place.

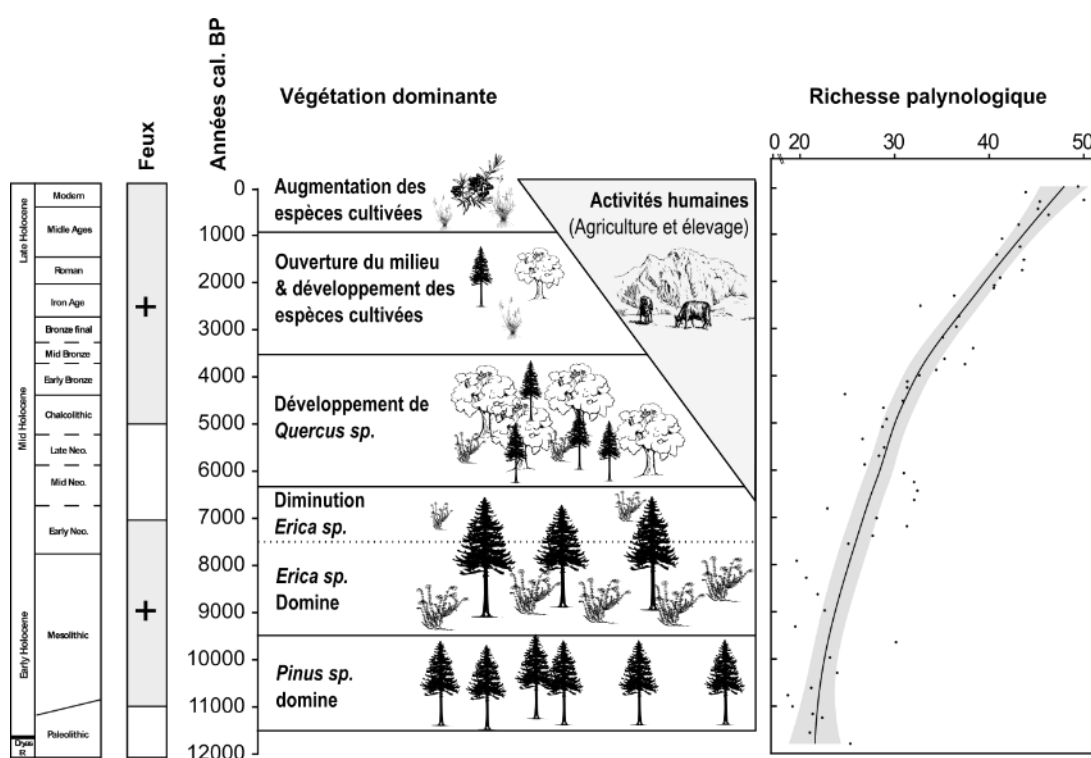


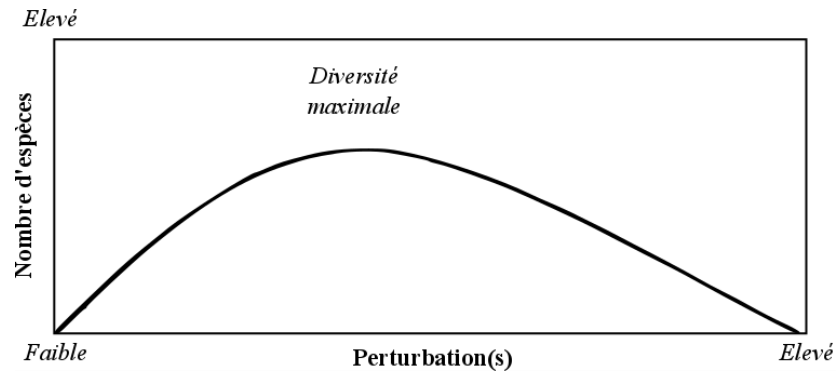
Figure VI.3 - Schéma de synthèse reprenant l'histoire du feu, de l'Homme et de la biodiversité en Corse au cours de l'Holocène.

## 2.1. LES FEUX EN MEDITERRANEE : UN BON EXEMPLE ILLUSTRANT

### L'HYPOTHESE DE LA « PERTURBATION-INTERMEDIAIRE »

L'hypothèse de la perturbation intermédiaire a été décrite pour la première fois en 1978 dans une étude sur la diversité des forêts tropicales et des récifs coralliens (Connell, 1978). L'auteur propose que lorsque la fréquence d'une perturbation est trop faible cela conduit à une trop forte compétition et favorise la domination de quelques espèces seulement, les plus compétitives. A l'inverse, des perturbations trop fréquentes éliminent les espèces incapables de recoloniser le milieu rapidement (Connell, 1978; Wilkinson, 1999). Ainsi, il existerait un taux de perturbations « optimal » pour maximiser la biodiversité (Figure VI.4).

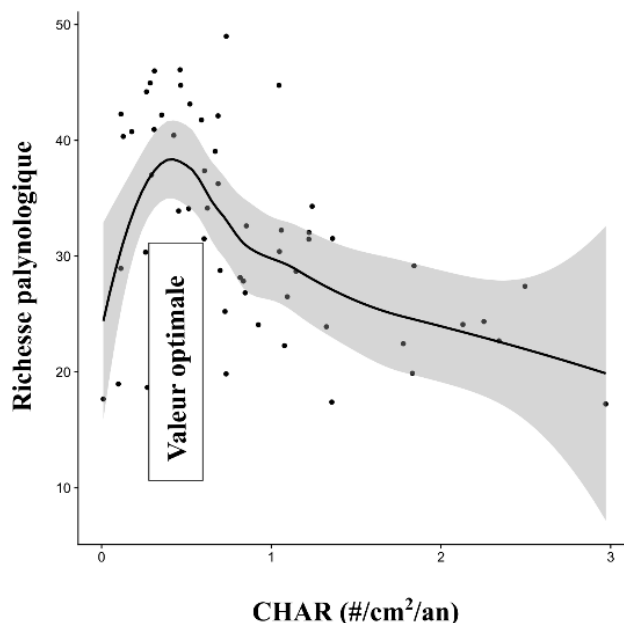




**Figure VI.4** - Schéma simplifié de l'hypothèse générale de la perturbation intermédiaire

Nos résultats ont révélé l'influence significative du feu en tant que perturbation sur la diversité végétale représentée par la diversité palynologique. Cette relation entre le feu et la biodiversité en Méditerranée a déjà fait l'objet de plusieurs études par le passé. Ainsi, Pausas et Ribeiro (2017) expliquent que le feu crée des mosaïques de paysages permettant une diversification des habitats et donc des espèces (Bird et al., 2008; Bond et Keeley, 2005; Cohn et al., 2015; Leys et al., 2018b). Le feu va alors augmenter l'équitabilité de la végétation en générant une hétérogénéité des paysages, ce qui conduira à une plus grande diversité (Stein et al., 2014). Nos résultats présentés dans le Chapitre III (**Figure III.3**) reflètent bien cet impact, positif dans un premier temps, du feu sur la végétation. Ainsi, plus le CHAR est élevé, plus la richesse palynologique augmente. Cette augmentation est rapide jusqu'à environ 0.5 charbons par cm<sup>2</sup> et par an. A partir de cette valeur, la richesse palynologique décroît lentement mais de façon continue. Il est alors possible d'adapter la **Figure VI.4** aux feux, en considérant que la perturbation « optimale » se situe autour de 0.5 charbons/cm<sup>2</sup>/an (**Figure VI.5**).





**Figure VI.5** - Hypothèse de la perturbation intermédiaire appliquée aux régimes de feux Holocène en Corse.

Ainsi, entre 9500 et 7500 ans cal. BP, le feu a permis d'ouvrir le milieu et donc la végétation jusqu'alors composée principalement de pins (*Pinus nigra*) et d'encourager l'expansion des bruyères (*Erica sp.*). Ces sous-bois de bruyères, qui se développent en début de succession (Beffa et al., 2016), sont aujourd'hui particulièrement adaptés aux feux récurrents (Curt et al., 2011b), notamment grâce à leurs fortes capacités de repousse (Lloret et al., 2004; Lloret et López-Soria, 1993) (**Figure VI.3**). Dans le cas de *Pinus sp.*, bien que relativement bien adapté aux feux, si la fréquence est trop élevée, il n'a pas le temps de produire assez de graines matures pour permettre à une nouvelle cohorte de pins, et donc une nouvelle pinède, de se développer (Noble et Slatyer, 1980). Ainsi, nous assistons à une diversification du milieu, qui passe d'une végétation principalement composée de pinèdes à des forêts plus ouvertes dominées par les pins et les bruyères et dont la richesse spécifique a augmenté.

## 2.2. L'AGRICULTURE ET LE PASTORALISME AUGMENTENT LA DIVERSITE

### VEGETALE

Le feu n'est cependant pas suffisant pour expliquer à lui seul l'importante diversité végétale des paysages Corses. En plus du feu, nous avons vu dans le Chapitre III (**Figure III.6**) qu'une augmentation du pâturage a permis d'augmenter la diversité végétale. Ces observations sont dans la lignée d'autres études, notamment au Portugal (Listopad et al., 2018), qui ont montré qu'un arrêt du pâturage pendant plus de 5 ans entraîne la fermeture du milieu et une diminution de la biodiversité végétale. Partant de ce constat, de nos résultats et des observations d'autres études (Colombaroli and Tinner, 2013; Correia, 1993; Saïd, 2002; Sedlar et al., 2018), et même si nous ne pouvons pas totalement exclure le rôle du climat, nous pensons avoir montré que les activités humaines traditionnelles pratiquées depuis environ 6000 ans cal. BP sont une des principales causes de l'extraordinaire diversité végétale de la Corse (**Figure VI.3**), reconnaissable par sa grande richesse spécifique en terme d'arbres (ex : *Quercus ilex*, *Quercus pubescens*, *Pinus nigra*, *Castanea sp.*, *Olea europea* ...), d'arbustes (ex : *Juniperus sp.*, *Arbutus unedo*, *Erica arborea* ...) et d'herbes (ex : *Plantago sp.*, *Poacea*, *Triticum sp.* ...) formant principalement des maquis (Mouillot et al., 2008). Ces activités se sont traduites, à partir du Néolithique, par une déforestation, en coupant et/ou en brûlant les arbres, en vue d'obtenir des terres de cultures et d'élevage (Carcaillet, 1998; Clark et al., 1989; Colombaroli et al., 2013; Janny and Costa, 2004; Mouillot et al., 2008; Tinner et al., 2005; Vannière et al., 2008; Vannière and Martineau, 2005).

Toutefois, nous avons également vu que la déprise pastorale et la désertification des campagnes observées depuis quelques décennies (Mouillot et al., 2005), additionnées à l'augmentation des espèces invasives importées lors d'échanges internationaux (Traveset et al., 2008), pourraient promouvoir à nouveau l'expansion des forêts aux dépens des maquis et induire une perte de biodiversité (Médail and Verlaque, 1997; Saïd, 2002; Whitlock et al., 2018) tout en augmentant la quantité de combustible. En parallèle, l'agriculture moderne s'est intensifiée et a entraîné un appauvrissement des sols en profondeur (Tsiafouli et al., 2015), réduisant ainsi la diversité végétale s'y rattachant (Benton et al., 2003; Tsiafouli et al., 2015). A cela s'ajoute une aridification

des paysages Corses due aux changements climatiques mondiaux (Giannakopoulos et al., 2009; Sheffield et Wood, 2008b), ce qui nous laisse supposer que les feux seront plus fréquents et intenses dans les années à venir malgré les efforts en terme de politiques de suppression des feux (Lahaye et al., 2014). Ainsi, cette augmentation du feu et de la quantité de combustibles dues aux activités humaines risquent de menacer la diversité végétale Corse.

### 2.3. DOIT-ON CHERCHER A MAXIMISER LA BIODIVERSITE ?

Nous avons vu que la végétation Corse était marquée depuis des millénaires par l'action de l'Homme qui a su tirer parti des peuplements végétaux au travers des techniques culturelles ou pastorales (Chapitre III). Ces techniques traditionnelles sont, avec les feux, les principales causes responsables de l'extraordinaire richesse de la végétation Corse et d'une manière générale de la végétation Méditerranéenne (Colombaroli and Tinner, 2013; Connor et al., 2019; Médail, 2017; Saïd, 2002; Tinner et al., 2016). Aujourd'hui, l'agriculture et l'élevage s'industrialisent, les campagnes se désertifient, les pratiques traditionnelles disparaissent et les milieux se referment (Correia, 1993; Mouillot et al., 2005; Sedlar et al., 2018). Ainsi, une question se pose : faut-il chercher à maximiser la biodiversité ?

De manière certaine, qu'elle soit écologique, symbolique ou économique, l'extinction massive d'espèces animales et végétales observée à l'échelle mondiale depuis quelques décennies est une des préoccupations majeures de nos sociétés modernes (Duffy, 2009). En Corse comme dans toute la Méditerranée, la diversité végétale présente de nombreux intérêts, notamment écologiques, que Bugalho et al. (2011) listent dans leur synthèse. Tout d'abord, la diversité végétale permet une diversification des habitats qui augmente la biodiversité des autres règnes (animaux, champignons...). Elle permet également une hétérogénéité de paysages, ce qui refreine les incendies trop intenses et en conséquence trop sévères (Joffre et al., 1999). De plus, les maquis Méditerranéens jouent un rôle important dans le budget global de carbone en captant et en conservant les stocks de carbone sur plusieurs décennies (Schaffhauser, 2009). Ces stocks peuvent atteindre 140 g/m<sup>2</sup>/an (Pereira, 2011), une valeur qui se situe entre le rang des savanes Californiennes (Balocchi et al., 2004) et celui des forêts tropicales (Murphy et al., 2011). Une biodiversité importante présente

d'autres intérêts, qu'ils soient agronomiques ou économiques (Underwood et al., 2009). Le contre-exemple le plus flagrant est celui des monocultures, pauvres en biodiversité par définition, qui sont meilleurs marchés dans un premier temps mais qui appauvrissent les sols et sont plus susceptibles aux maladies, les rendant moins productives et moins rentables à plus long terme (Tsiafouli et al., 2015).

Si l'on souhaite aujourd'hui protéger la biodiversité, les paysages Méditerranéens sont alors des exemples forts qui nous montrent que l'Homme, en s'associant à la nature dont il fait partie, peut à certains moments prendre le rôle d'un formidable générateur de biodiversité.

### **3. UN ENVIRONNEMENT DE PLUS EN PLUS PROPICE AUX FEUX DANS LES DECENNIES A VENIR**

Depuis quelques décennies, nous observons un déclin des pratiques pastorales et un abandon des terres agricoles qui entraînent une fermeture des milieux (Mouillot et al., 2005; San Roman Sanz et al., 2013a). A cela s'ajoute le réchauffement climatique, et en particulier l'augmentation des températures et de la sécheresse estivales, ce qui pourra promouvoir des futurs feux (Dai, 2011; Giannakopoulos et al., 2005; Médail, 2017; Moriondo et al., 2006; Mouillot et al., 2002, 2003; Sheffield et Wood, 2008b). Des feux ont déjà lieu dans de nombreuses parties du monde et sont parfois devenus incontrôlables malgré tous les efforts mis en place en terme de politique d'incendies (Bowman et al., 2009; Forsyth et Van Wilgen, 2008; Lohman et al., 2007; Westerling et al., 2006a). Les incendies dans la forêt Amazonienne des dernières semaines en sont l'exemple le plus récent.

Pour prédire les différents scénarios dus aux changements climatiques, le GIEC a mis en place 4 scénarios RCP (Meinshausen et al., 2011; Moss et al., 2008, 2010; van Vuuren et al., 2011) qui représentent donc les différentes énergies radiatives (2.6, 4.5, 6.0, et 8.5 Watts/m<sup>2</sup>) que gagnera la Terre jusqu'à 2100, remplaçant ainsi les anciens scénarios (SRES A1, A2, B1, et B2). Dans cette partie de la discussion, nous nous attarderons sur l'évolution du climat et du danger de feu pour les décennies à venir et sur leurs potentiels impacts en fonction de deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5).

### 3.1. LES FEUX FUTURS SERONT-ILS SIMILAIRES A CEUX OBSERVES AU DEBUT DE L'Holocène ?

Nos travaux ont montré que pour les deux scénarios RCP, l'aléa incendies (estimé par le MDC) et la longueur de la saison de feux augmenteront jusqu'en 2100, et que ces augmentations seront synchrones jusqu'en 2040 / 2050 pour se différencier ensuite. Ceci s'explique car les émissions totales de CO<sub>2</sub> pour scénario RCP 4.5 sont censées augmenter jusqu'à atteindre 42 Gt CO<sub>2</sub> par an en 2040, pour diminuer ensuite jusqu'à 15 Gt CO<sub>2</sub> par an en 2080 avant de se stabiliser à cette valeur jusqu'à la fin du siècle (Thomson et al., 2011). A l'inverse, le scénario RCP 8.5 « le plus pessimiste » sera caractérisé par une augmentation constante du CO<sub>2</sub> qui dépassera 120 Gt CO<sub>2</sub> en 2100 (Riahi et al., 2011).

L'augmentation de l'aléa de feu prédit jusqu'en 2100 est très rapide et le MDC passe de 424 à 456 pour le scénario RCP 4.5 et de 429 à 519 pour le RCP 8.5 entre 2020 et 2100, soit 7% et 17% d'augmentation respectivement. Cette augmentation est encore plus marquée si nous regardons la longueur de saison de feux qui passe de 105 à 130 jours pour le scénario RCP 4.5 et de 113 à 158 jours pour le RCP 8.5, soit 19% et 28% d'augmentation respectivement. Au cours de l'Holocène, de telles valeurs de MDC n'ont pas été obtenues depuis 6000 ans cal. BP, et la longueur de saison de feux future va excéder le maximum Holocène dès 2040, quel que soit le scénario (**Figure V.2**). De plus, une étude de Giannakopoulos et al. (2005) montre qu'une augmentation annuelle de 2°C se répercutera surtout en été et que la saison de feux augmentera d'environ 1 mois, ce qui est dans la lignée de la haute saisonnalité et de l'allongement de la saison de feux prédits dans nos résultats. Ces augmentations seront particulièrement marquées en juin, juillet et août, indiquant une forte saisonnalité dans le futur, caractérisé par des conditions estivales encore plus chaudes et plus sèches. Plusieurs auteurs ont étudié les relations actuelles entre le climat et le feu en région Méditerranéenne et la majorité d'entre eux affirme que le réchauffement climatique augmentera les feux.

Pour autant, pouvons-nous estimer que les feux futurs seront les mêmes qu'au début de l'Holocène ? Non, car comme nous l'avons vu précédemment, d'autres facteurs, telles que les activités humaines peuvent également impacter les régimes de feux.

Ainsi, alors que le début de l'Holocène était caractérisé majoritairement par des pinèdes peu diversifiées et des sous-bois de bruyères (Reille, 1992a; Reille et al., 1999), la végétation actuelle est plus diversifiée et composée majoritairement d'herbes, de végétation arbustives et de forêts éparses (Gauthier et al., 1983; Reille et al., 1997, 1999). Au début de l'Holocène, les conditions climatiques ont entraîné des feux fréquents qui ont ouvert et diversifié le milieu (Beffa et al., 2016; Lestienne et al., 2019b). Aujourd'hui, les feux sont principalement dus aux activités humaines (Curt et al., 2016) et à l'augmentation des interfaces villes / forêts en réponse à la croissance démographique (Calviño-Cancela et al., 2017; Curt et al., 2007; Pausas, 2004). Toutefois, la plupart des études s'accordent à dire que l'augmentation de la sécheresse contribuera fortement à augmenter la fréquence et l'intensité des feux de forêts en Méditerranée (Batllori et al., 2013; Giannakopoulos et al., 2005; Pausas, 2004), notamment dans le sud de la France et en Corse (Lahaye et al., 2018a; Lestienne et al., 2019b; Mouillot et al., 2002; Ruffault, 2012; Ruffault et al., 2017a). Par exemple, Amatulli et al. (2013) ont estimé que les surfaces brûlées pourraient augmenter de 66 à 140% aux environs de 2100 en fonction du scénario RCP étudié. De plus, une étude de Giannakopoulos et al. (2005) a montré qu'une augmentation annuelle de 2°C se répercutera surtout en été et que la saison de feux augmentera d'environ 1 mois, ce qui est dans la lignée de la haute saisonnalité et de l'allongement de la saison de feux prédits dans nos résultats. Pour la première fois dans l'histoire humaine, nous sommes confrontés à une augmentation simultanée de la sécheresse et de l'impact humain, ce qui aura pour conséquence d'augmenter considérablement la fréquence et l'intensité des feux (Amatulli et al., 2013; Giannakopoulos et al., 2005; Moriondo et al., 2006).

### 3.2. QUELLES CONSEQUENCES POSSIBLES ET QUELLES MESURES ADOPTER ?

Une augmentation trop forte du feu associée à l'accentuation de la sécheresse pourraient entraîner une diminution significative de la biodiversité végétale en Corse (Chapitre III) (Botkin et al., 2007; Lestienne et al., 2019b; Pausas et al., 2009b; Pausas et Ribeiro, 2017; Pausas et Vallejo, 1999) ce qui, indirectement, entraînerait des pertes économiques (en plus de la perte écologique évidente) liées à la diminution du tourisme notamment (Magnan et al., 2013). Dans sa thèse, Frejaville (2015) montre que certaines espèces comme le pin noir (*Pinus nigra*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) dans les Alpes, également très présents en Corse, risquent de voir leurs populations diminuer fortement. De plus, plusieurs auteurs ont montré que les changements climatiques tendraient à accroître la vulnérabilité des écosystèmes supra-Méditerranéens (Dai, 2011; Frejaville, 2015).

En France, les incendies marquants qui ont eu lieu dans les années 1990 ont permis la mise en place d'une politique de lutte contre les incendies très efficace sous des conditions météorologiques normales (Curt et Frejaville, 2018). Toutefois, les capacités d'actions de cette stratégie risquent d'être mises à mal sous les conditions plus extrêmes prévues pour les années à venir (Curt et Frejaville, 2018; Lahaye et al., 2018b; Moriondo et al., 2006), et les grands feux de 2003, 2016, ou 2019 nous ont déjà donné un aperçu des limites de notre contrôle sur le feu.

Pour contrer cette augmentation, la seule suppression des feux déjà déclarés sera insuffisante (Stephens et al., 2013). Ainsi, il sera probablement nécessaire de recourir à des feux contrôlés (Fernandes, 2013), d'encourager le pâturage (D. Syphard et al., 2007; Lestienne et al., 2019b), mais aussi de repenser notre agriculture en réduisant les charges potentielles de combustibles et en fragmentant leur répartition dans l'espace (Benali et al., 2017; Fernandes, 2013). Afin de prévenir les risques économiques et humains, nous devons également revoir de manière drastique l'urbanisation des territoires propices aux feux (Stephens et al., 2013).

## 4. DE NOUVEAUX OUTILS DISPONIBLES

Les résultats de cette thèse ont été obtenus grâce à des méthodes ayant fait leurs preuves comme la palynologie (ex: Amami et al., 2010; Fægri et al., 1989; Odgaard, 2001) incluant l'utilisation d'indices de diversités (ex: Felde et al., 2016; Knaap, 2009; Meltsov et al., 2011; Odgaard, 2001; Weng et al., 2006), l'étude des charbons de bois (ex: Ali et al., 2009; Beffa et al., 2016; Pausas et Vallejo, 1999) incluant la morphologie (ex: Enache et Cumming, 2006; Jensen et al., 2007; Mustaphi et Pisaric, 2014), ou encore l'étude des spores de champignons (ex: Cugny et al., 2010; Ejarque et al., 2011; Etienne et Jouffroy-Bapicot, 2014; van Geel, 2006). A cela s'ajoutent de nouveaux outils mais également de nouvelles utilisations d'outils déjà existants que nous décrirons dans cette partie de la discussion.

### 4.1. NOUVELLES APPROCHES POUR CARACTERISER LA MORPHOLOGIE DES CHARBONS DE BOIS

Tout d'abord, nos comptages et nos mesures de charbons ont été effectués à l'aide du microscope Keyence VHX-5000 (<https://www.keyence.fr/>), utilisé pour la première fois dans ce genre d'analyse. Il s'agit d'un microscope numérique couplé à une caméra haute résolution jusqu'ici utilisé principalement en ingénierie (ex: Naito et Oguma, 2017; Poulain et al., 2017; Schwitalla et al., 2017). Ce microscope a le grand avantage de créer rapidement des assemblages d'images en haute résolution permettant d'observer en une seule fois des échantillons entiers. A partir de cette nouvelle image, nous donnons les caractéristiques des charbons de bois (couleurs et brillance), le microscope étant désormais capable de discriminer les particules de charbons des autres particules. Pour chaque particule comptabilisée, une série d'informations est enregistrée : longueur, largeur, périmètre, aire, etc. Ce comptage est semi-automatique dans le sens où il est nécessaire de vérifier visuellement les particules qui ont été sélectionnées afin d'enlever celles qui ne sont pas du charbon. Cette méthode se rapproche du logiciel WinSeedle (WinSeedle 2016, © Regent Instruments Inc., QC, Canada), également capable de compter et mesurer les particules du charbon efficacement. Le grand avantage du microscope Keyence utilisé dans cette thèse vient



du fait qu'il soit capable de créer rapidement une image en très haute définition de l'ensemble d'un échantillon en très peu de temps (moins de 5 min avec une mise au point sur chaque image assemblée), et que la caméra soit intégrée au microscope, rendant le tout très facile à prendre en main.

A partir de ces mesures, nous avons également analysé la morphologie des charbons et étudié les changements. La morphologie des charbons a déjà été étudiée par le passé, notamment en vue de comprendre les types de combustibles brûlés (Enache et Cumming, 2006; Leys et al., 2017; Mustaphi et Pisaric, 2014; Umbanhowar et Mcgrath, 1998). La première étude ayant regardé la morphologie des particules de charbons a été faite par Patterson et al. (1987). Leurs travaux ont souligné le lien qui existait entre la taille de la particule et sa provenance : plus une particule est petite plus elle vient de loin. Ainsi, cette idée a ensuite été reprise par Clark et Royall (1995) qui ont montré qu'une petite particule représente un signal régional alors qu'une grosse particule représente un signal plus local. Néanmoins, des études plus récentes ont nuancé ces propos en suggérant que ces différences de tailles pouvaient tout autant être le fruit d'une différence de type de feu ou celui de processus taphonomiques (incluant le transport) différents (Ali et al., 2009; Leys et al., 2013; Whitlock et Larsen, 2002).

Le premier ratio que nous avons utilisé dans cette thèse est le ratio Longueur / Largeur, et il a été utilisé pour la première fois par Umbanhowar et Mcgrath (1998) pour caractériser le type de combustible brûlé : les particules allongées correspondent à un combustible majoritairement herbacé tandis qu'un ratio intermédiaire correspond plutôt à un combustible majoritairement ligneux. Depuis, plusieurs auteurs ont essayé de développer des classifications des différents morphotypes de charbons. Parmi eux, Jensen et al. (2007) ont défini 5 morphotypes qu'ils ont comparé à des charbons obtenus lors de brûlages contrôlés sur du bois moderne. A partir de cette expérience, ils ont pu montrer que les herbes, le bois des conifères et certaines feuilles produisaient des morphotypes de charbons différents et reconnaissables. Dans la même lignée, Enache et Cumming (2006) ont défini 7 morphotypes de charbons. Toutefois, contrairement à l'étude précédente, ils suggèrent que la morphologie des charbons est plutôt dûe aux conditions bio-géo-climatiques et aux caractéristiques du bassin versant et qu'ils pourraient donc nous informer sur les conditions de feux et de climats passés. A partir de ces deux études, Mustaphi et Pisaric (2014) ont développé une

classification comprenant 27 morphotypes de charbons. Parmi leurs conclusions, nous pouvons noter que certains morphotypes peuvent facilement être attribués à des combustibles spécifiques. C'est le cas pour les charbons allongés qui correspondent majoritairement à des herbes, et pour les charbons poreux qui correspondent majoritairement à des feuilles. Certains morphotypes peuvent également être utilisés comme des indicateurs du type de signal ou de transport.

Ainsi, nous avons étudié dans cette thèse les différences de taille des particules ainsi que le ratio Longueur / largeur. Mais nous avons également étudié l'évolution du rapport Aire / Périmètre, utilisé pour la première fois pour caractériser des charbons. Ce ratio nous a permis de trouver des différences morphologiques entre les charbons présents sur les trois périodes principales caractérisées par un régime de feux soutenus, et nous a ainsi aidé à mettre en évidence des changements de régimes de feux.

#### 4.2. LE MDC, UN INDICE SIMPLE ET EFFICACE POUR OBTENIR DES TENDANCES CLIMATIQUES GÉNÉRALES DE L'ALÉA INCENDIE ET POUR DISCRIMINER LES FEUX CLIMATIQUES DES FEUX ANTHROPIQUES SUR LA BASES D'ENREGISTREMENTS PALEOÉCOLOGIQUES

Ces travaux de thèse ont aussi permis de tester l'efficacité du MDC pour la première fois sur le passé et en Méditerranée. L'efficacité du FWI avait déjà été montrée dans plusieurs études en Méditerranée (Bedia et al., 2014; Camia et Amatulli, 2009; Carvalho et al., 2008; Dimitrakopoulos et al., 2011; Fréjaville et Curt, 2015; Moriando et al., 2006) afin de prédire les risque de feux en temps réel (Dupire et al., 2017; Lahaye et al., 2018a; Ruffault et al., 2016, 2017a; Schunk et al., 2017). Nos résultats suggèrent que leur utilisation est valable, en particulier pour le DC, pour détecter les jours de feux des jours sans feu sur la période actuelle, mais également d'associer des tailles de feux à des valeurs de DC. Cet indice, n'ayant besoin que de données de températures et de précipitations, apparaît comme étant un outil idéal pour détecter les feux en Méditerranée lorsque des données quotidiennes sont accessibles. De plus, en définissant une valeur seuil, nous avons pu estimer le danger de feux ainsi que la longueur de saison de feux.

Toutefois, travaillant sur le passé avec un accès restreint voire impossible aux données météorologiques quotidiennes, il a été nécessaire de trouver une alternative au DC. Ainsi, nos résultats ont permis de montrer l'intérêt du MDC qui est une très bonne alternative au DC lorsque seules des données mensuelles sont disponibles. Nous avons en effet trouvé une très forte corrélation entre le MDC et la moyenne des DC mensuels, cette corrélation étant encore plus élevée qu'en région boréale pour laquelle ces indices ont été développés (Girardin et Wotton, 2009). En comparant la longueur de saison de feux actuelle en Corse à partir des valeurs actuelles de MDC (111 jours), avec celle calculée *via* le DC (106 jours), nous avons pu voir qu'elles étaient très similaires. De plus, elles sont très proches des longueurs de saison de feux observées actuellement en Méditerranée (Bedía et al., 2014; Moriondo et al., 2006), ce qui nous a permis de valider la pertinence de l'utilisation du MDC pour la région Méditerranéenne et de l'appliquer à des périodes différentes de l'actuel, du moment que des données de températures maximales mensuelles et de cumul mensuel de précipitations sont disponibles, archivées ou simulées.

## 5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux de thèse ont permis de reconstruire l'histoire de la végétation, du feu, du climat et de l'Homme pour tout l'Holocène et nous avons pu entrevoir les relations complexes qu'il existe entre ces composantes. Aujourd'hui, le régime de feu et la biodiversité Corse sont en grande partie dus à l'Homme qui a façonné l'environnement au cours des derniers millénaires. Ainsi, l'Homme a montré qu'au-delà de son pouvoir tristement « destructeur » mis en avant par notre époque, il a pu être dans le passé un « générateur » important de biodiversité.

Aujourd'hui, nous sommes confrontés à un réchauffement climatique indépendant des cycles climatiques naturels qui, ajouté à l'augmentation de combustibles disponibles suite à la déprise pastorale, entraînera une augmentation dangereuse des conditions favorables aux feux, menaçant ainsi les habitations vulnérables et la biodiversité déjà mise à mal. Pour contrer cette augmentation, la seule suppression des feux déjà déclarés sera insuffisante et il sera probablement nécessaire de recourir à des feux contrôlés, d'encourager le pâturage, mais aussi de repenser notre agriculture en réduisant et fragmentant les combustibles au sein des paysages Méditerranéens. Afin de prévenir les risques économiques et humains, nous devons également revoir de manière drastique l'urbanisation des territoires propices aux feux.

Dans un contexte où les incendies deviennent de plus en plus incontrôlables en France, mais aussi dans le monde (ex : en Californie, en régions boréales ou en Amazonie), il devient donc plus que nécessaire de prévoir les évolutions futures du climat et des feux afin d'estimer les risques et de développer une gestion adaptative de ces écosystèmes sensibles. Néanmoins, même si les connaissances passées sont primordiales pour appréhender le futur avec un recul nécessaire, elles ne peuvent être suffisantes tant le contexte spatio-temporel est important. Ainsi, il est nécessaire de développer des collaborations dans des domaines complémentaires tels que la paléoécologie, l'écologie, ou encore la modélisation.

D'autre part, La Corse, bien qu'étant un bon reflet des tendances globales en matière de climat, de feux et d'activités humaines au sein du bassin Méditerranéen, ne saurait représenter l'ensemble des écosystèmes Méditerranéens tant ils sont divers. En Corse, comme en général dans le bassin Méditerranéen, les comparaisons manquent. Il serait

donc intéressant d'étudier d'autres lacs en Méditerranée afin de mettre en perspective notre étude avec les dynamiques de la végétation et du régime de feux enregistrées dans d'autres zones Méditerranéennes en faisant par exemple un transect Ouest – Est qui viendrait compléter les données déjà existantes en Espagne, en France et en Italie. Il serait également intéressant d'étudier les autres îles Méditerranéennes afin de comparer leur capacité en tant que capteurs régionaux et/ou locaux des événements passés.

Enfin, il est important de souligner que le feu et l'Homme ne sont pas les seules perturbations pouvant impacter la végétation, et l'étude d'autres perturbations telles que les épidémies d'insectes par l'analyse dendrochronologique d'arbres fossiles (ex. Sonia et al., 2011) ou des céphalées ou excréments d'insectes (ex. Simard et al., 2002), pourrait permettre de mieux comprendre les dynamiques de végétation.

Malgré ces limites, cette thèse contribue à offrir une meilleure compréhension de la dynamique des paysages Méditerranéens grâce à des études multi-proxies précisément datées. Elle offre également des perspectives encourageantes quant à l'utilisation d'indices « actuels » (ici le MDC) pour des périodes plus anciennes ou à venir, permettant un nouvel éclairage sur les origines passées des feux et sur les conséquences à venir des changements climatiques en terme de danger de feux.



## BIBLIOGRAPHIE

---

---

Aguado I, Chuvieco E, Martin P and Salas J (2003) Assessment of forest fire danger conditions in southern Spain from NOAA images and meteorological indices. *International Journal of Remote Sensing* 24(8): 1653–1668.

Ahlström A, Schurgers G, Arneth A and Smith B (2012) Robustness and uncertainty in terrestrial ecosystem carbon response to CMIP5 climate change projections. *Environmental Research Letters* 7(4): 044008.

Albini FA and Reinhardt ED (1995) Modeling ignition and burning rate of large woody natural fuels. *International Journal of Wildland Fire* 5(2): 81–91.

Alessio GA, De Lillis M, Fanelli M, Pinelli P and Loreto F (2004) Direct and indirect impacts of fire on isoprenoid emissions from Mediterranean vegetation. *Functional Ecology* 18(3): 357–364.

Ali AA, Higuera PE, Bergeron Y and Carcaillet C (2009) Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. *Quaternary Research* 72(3): 462–468: doi:10.1016/j.yqres.2009.07.002.

Amami B, Muller SD, Rhazi L, Grillas P, Rhazi M and Bouahim S (2010) Modern pollen–vegetation relationships within a small Mediterranean temporary pool (western Morocco). *Review of Palaeobotany and Palynology* 162(2): 213–225: doi:10.1016/j.revpalbo.2010.06.012.

Amatulli G, Camia A and San-Miguel-Ayanz J (2013) Estimating future burned areas under changing climate in the EU-Mediterranean countries. *Science of the total environment* 450: 209–222.

Aranbarri J, González-Sampériz P, Valero-Garcés B, Moreno A, Gil-Romera G, Sevilla-Callejo M, et al. (2014) Rapid climatic changes and resilient vegetation during the Lateglacial and Holocene in a continental region of south-western Europe. *Global and Planetary Change* 114: 50–65: doi:10.1016/j.gloplacha.2014.01.003.

Archibald S, Lehmann CE, Belcher CM, Bond WJ, Bradstock RA, Daniiau A-L, et al. (2018) Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system. *Environmental Research Letters* 13(3): 033003.

Bailly A (1930) *Abrégé du dictionnaire grec français*. Hachette.

- Bajard M, Poulénard J, Sabatier P, Etienne D, Ficetola F, Chen W, et al. (2017) Long-term changes in alpine pedogenetic processes: Effect of millennial agro-pastoralism activities (French-Italian Alps). *Geoderma* 306: 217–236.
- Baker A, Bhagwat S and Willis K (2013) Do dung fungal spores make a good proxy for past distribution of herbivores? *Quaternary Science Reviews* 62: 21–31: doi:10.1016/j.quascirev.2012.11.018.
- Baldocchi DD, Xu L and Kiang N (2004) How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak–grass savanna and an annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* 123(1–2): 13–39.
- Bastianelli C (2018) Changements globaux et dynamiques forestières des pessières du Québec au cours des 8000 dernières années à partir d’approches paléoécologiques et biogéochimiques. thesis, Paris Sciences et Lettres. Available at: <http://www.theses.fr/2018PSLEP044>.
- Batllori E, Parisien M-A, Krawchuk MA and Moritz MA (2013) Climate change-induced shifts in fire for Mediterranean ecosystems: Fire shifts in Mediterranean ecosystems. *Global Ecology and Biogeography* 22(10): 1118–1129: doi:10.1111/geb.12065.
- Bedia J, Herrera S, Camia A, Moreno JM and Gutiérrez JM (2014) Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. *Climatic Change* 122(1): 185–199: doi:10.1007/s10584-013-1005-z.
- Beffa G, Pedrotta T, Colombaroli D, Henne PD, van Leeuwen JFN, Süssstrunk P, et al. (2016) Vegetation and fire history of coastal north-eastern Sardinia (Italy) under changing Holocene climates and land use. *Vegetation History and Archaeobotany* 25(3): 271–289: doi:10.1007/s00334-015-0548-5.
- Behre K-E (1981) The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et spores* 23(2): 225–245.
- Benali A, Sá ACL, Ervilha AR, Trigo RM, Fernandes PM and Pereira JMC (2017) Fire spread predictions: Sweeping uncertainty under the rug. *Science of The Total Environment* 592: 187–196: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.106.
- Bennett KD and Willis KJ (2001) Pollen. In: Smol JP, Birks HJB, Last WM, Bradley RS and Alverson K (eds) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht: Springer Netherlands, 5–32. Available at: [https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1\\_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_2): doi:10.1007/0-306-47668-1\_2.
- Benton TG, Vickery JA and Wilson JD (2003) Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in ecology & evolution* 18(4): 182–188.
- Berger A and Loutre MF (1991) Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews* 10(4): 297–317: doi:10.1016/0277-3791(91)90033-Q.



Berger J-F and Guilaine J (2009) The 8200 cal BP abrupt environmental change and the Neolithic transition: A Mediterranean perspective. *Quaternary international* 200(1–2): 31–49.

Bergeron Y, Cyr D, Girardin MP and Carcaillet C (2011) Will climate change drive 21st century burn rates in Canadian boreal forest outside of its natural variability: collating global climate model experiments with sedimentary charcoal data. *International Journal of Wildland Fire* 19(8): 1127–1139.

Bird RB, Bird DW, Coddling BF, Parker CH and Jones JH (2008) The “fire stick farming” hypothesis: Australian Aboriginal foraging strategies, biodiversity, and anthropogenic fire mosaics. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(39): 14796–14801.

Birks HJB, Felde VA, Bjune AE, Grytnes J-A, Seppä H and Giesecke T (2016) Does pollen-assemblage richness reflect floristic richness? A review of recent developments and future challenges. *Review of Palaeobotany and Palynology* 228: 1–25: doi:10.1016/j.revpalbo.2015.12.011.

Birks HJB and Line JM (1992) The use of rarefaction analysis for estimating palynological richness from Quaternary pollen-analytical data. *The Holocene* 2(1): 1–10.

Blaauw M (2010) R-Code for “classical” age-modelling (CLAM V1.0) of radiocarbon sequences. *Supplement to: Blaauw, M (2010): Methods and code for “classical” age-modelling of radiocarbon sequences. Quaternary Geochronology, 5(5), 512-518, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2010.01.002>. Available at: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.873023>: doi:<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.873023>.*

Blarquez O, Ali AA, Girardin MP, Grondin P, Fréchette B, Bergeron Y, et al. (2015) Regional paleofire regimes affected by non-uniform climate, vegetation and human drivers. *Scientific Reports* 5(1). Available at: <http://www.nature.com/articles/srep13356>: doi:10.1038/srep13356.

Boisvenue Cél and Running SW (2006) Impacts of climate change on natural forest productivity—evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12(5): 862–882.

Bonan GB (2008) Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *science* 320(5882): 1444–1449.

Bond WJ and Keeley JE (2005) Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in ecology & evolution* 20(7): 387–394.

Botkin DB, Saxe H, Araújo MB, Betts R, Bradshaw RHW, Cedhagen T, et al. (2007) Forecasting the Effects of Global Warming on Biodiversity. *BioScience* 57(3): 227: doi:10.1641/B570306.

Bowman DMJS, Balch JK, Artaxo P, Bond WJ, Carlson JM, Cochrane MA, et al. (2009) Fire in the Earth System. *Science* 324(5926): 481–484: doi:10.1126/science.1163886.

- Bradstock RA (2010) A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications. *Global Ecology and Biogeography* 19(2): 145–158: doi:10.1111/j.1466-8238.2009.00512.x.
- Bragg FJ, Lunt DJ and Haywood AM (2012) Mid-Pliocene climate modelled using the UK Hadley Centre Model: PlioMIP Experiments 1 and 2. *Geoscientific Model Development* 5(5): 1109–1125: doi:https://doi.org/10.5194/gmd-5-1109-2012.
- Brewer S, Alleaume S, Guiot J and Nicault A (2007) Historical droughts in Mediterranean regions during the last 500 years: a data/model approach. *Climate of the Past* 3(2): 355–366: doi:https://doi.org/10.5194/cp-3-355-2007.
- BRGM (2009) *Carte géologique harmonisée du département de la Haute-Corse.* , 492. Available at: <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57748-FR.pdf>.
- Brown TA, Jones MK, Powell W and Allaby RG (2009) The complex origins of domesticated crops in the Fertile Crescent. *Trends in ecology & evolution* 24(2): 103–109.
- Bugalho MN, Caldeira MC, Pereira JS, Aronson J and Pausas JG (2011) Mediterranean cork oak savannas require human use to sustain biodiversity and ecosystem services. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(5): 278–286.
- Bujarhs F, Perez-Obiol R, Roure J and Julia R (1994) Dinámica de la vegetación durante el Holoceno en la isla de Mallorca. *Trabajos de Palinología Básica y Aplicada. X Simposio de Palinología, Valencia*, 199–210.
- Bürger G (2013) Evaluation of the Monthly Drought Code as a metric for fire weather in a region of complex terrain and un-certainties in future projections. *Pacific Climate Impacts Consortium*. Available at: [https://www.academia.edu/18700645/Evaluation\\_of\\_the\\_Monthly\\_Drought\\_Code\\_as\\_a\\_metric\\_for\\_fire\\_weather\\_in\\_a\\_region\\_of\\_complex\\_terrain\\_and\\_un-certainties\\_in\\_future\\_projections](https://www.academia.edu/18700645/Evaluation_of_the_Monthly_Drought_Code_as_a_metric_for_fire_weather_in_a_region_of_complex_terrain_and_un-certainties_in_future_projections).
- Bytebier B, Antonelli A, Bellstedt DU and Linder HP (2011) Estimating the age of fire in the Cape flora of South Africa from an orchid phylogeny. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 278(1703): 188–195.
- Calviño-Cancela M, Chas-Amil ML, García-Martínez ED and Touza J (2017) Interacting effects of topography, vegetation, human activities and wildland-urban interfaces on wildfire ignition risk. *Forest Ecology and Management* 397: 10–17: doi:10.1016/j.foreco.2017.04.033.
- Camia A and Amatulli G (2009) Weather factors and fire danger in the Mediterranean. *Earth observation of wildland fires in Mediterranean ecosystems*. Springer, 71–82.
- Caratini R (1995) *Histoire du peuple corse*. Criterion.
- Carcaillet C (1998) A spatially precise study of Holocene fire history, climate and human impact within the Maurienne valley, North French Alps. *Journal of ecology* 86(3): 384–396.

Carcaillet C, Barakat HN, Panaïotis C and Loisel R (1997) Fire and late-Holocene expansion of *Quercus ilex* and *Pinus pinaster* on Corsica. *Journal of Vegetation Science* 8(1): 85–94.

Carcaillet C, Bouvier M, Fréchette B, Larouche AC and Richard PJ (2001) Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history. *The Holocene* 11(4): 467–476.

Carrión JS and Van Geel B (1999) Fine-resolution Upper Weichselian and Holocene palynological record from Navarrés (Valencia, Spain) and a discussion about factors of Mediterranean forest succession. *Review of Palaeobotany and Palynology* 106(3–4): 209–236.

Carvalho A, Flannigan MD, Logan K, Miranda AI and Borrego C (2008) Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. *International Journal of Wildland Fire* 17(3): 328–338.

Catchpole EA, Alexander ME and Gill AM (1992) Elliptical-fire perimeter- and area-intensity distributions. *Canadian Journal of Forest Research* 22(7): 968–972: doi:10.1139/x92-129.

Chouard P (1935) Les tourbières de pelouses, ou pozzines, dans les Pyrénées, formations homologues des pozzines de Corse. *Bulletin de la Société Botanique de France* 82(5): 632–642: doi:10.1080/00378941.1935.10833025.

Churkina G and Running SW (1998) Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems* 1(2): 206–215.

Chylek P, Li J, Dubey MK, Wang M and Lesins G (2011) Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian earth system model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 11(8): 22893–22907.

Clark JS, Merkt J and Muller H (1989) Post-glacial fire, vegetation, and human history on the northern alpine forelands, south-western Germany. *The Journal of Ecology* 897–925.

Clark JS and Royall PD (1995a) Particle-size evidence for source areas of charcoal accumulation in late Holocene sediments of eastern North American lakes. *Quaternary Research* 43(1): 80–89.

Clark JS and Royall PD (1995b) Particle-Size Evidence for Source Areas of Charcoal Accumulation in Late Holocene Sediments of Eastern North American Lakes. *Quaternary Research* 43(1): 80–89: doi:10.1006/qres.1995.1008.

Cohn JS, Di Stefano J, Christie F, Cheers G and York A (2015) How do heterogeneity in vegetation types and post-fire age-classes contribute to plant diversity at the landscape scale? *Forest Ecology and management* 346: 22–30.

Colombaroli D, Beckmann M, van der Knaap WO, Curdy P and Tinner W (2013) Changes in biodiversity and vegetation composition in the central Swiss Alps during the transition from pristine forest to first farming. *Diversity and Distributions* 19(2): 157–170.

- Colombaroli D, Marchetto A and Tinner W (2007) Long-term interactions between Mediterranean climate, vegetation and fire regime at Lago di Massaciuccoli (Tuscany, Italy). *Journal of Ecology* 95(4): 755–770: doi:10.1111/j.1365-2745.2007.01240.x.
- Colombaroli D and Tinner W (2013) Determining the long-term changes in biodiversity and provisioning services along a transect from Central Europe to the Mediterranean. *The Holocene* 23(11): 1625–1634.
- Colombaroli D, Tinner W, Leeuwen JV, Noti R, Vescovi E, Vannière B, et al. (2009) Response of broadleaved evergreen Mediterranean forest vegetation to fire disturbance during the Holocene: insights from the peri-Adriatic region. *Journal of Biogeography* 36(2): 314–326: doi:10.1111/j.1365-2699.2008.01987.x.
- Colombaroli D, Vannière B, Emmanuel C, Magny M and Tinner W (2008) Fire—vegetation interactions during the Mesolithic—Neolithic transition at Lago dell’Accesa, Tuscany, Italy. *The Holocene* 18(5): 679–692.
- Conchon O (1986) Quaternary glaciations in Corsica. *Quaternary Science Reviews* 5: 429–432: doi:10.1016/0277-3791(86)90208-8.
- Conchon O (1988) Manifestation et chronologie de la d glaciation fini-w rmiennne en Corse. *Bulletin de l’Association française pour l’étude du quaternaire* 25(2): 91–96: doi:10.3406/quate.1988.1869.
- Connell JH (1978) Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* 199(4335): 1302–1310.
- Connor SE, Vannière B, Colombaroli D, Anderson RS, Carrión JS, Ejarque A, et al. (2019) Humans take control of fire-driven diversity changes in Mediterranean Iberia’s vegetation during the mid–late Holocene. *The Holocene* 0959683619826652: doi:10.1177/0959683619826652.
- Correia T (1993) Land abandonment: changes in the land use patterns around the Mediterranean basin. *Cahiers Options Méditerranéennes* 1(2): 97–112.
- Costanza R, d’Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, et al. (1997) The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *nature* 387(6630): 253.
- Cowling RM, Rundel PW, Lamont BB, Kalin Arroyo M and Arianoutsou M (1996) Plant diversity in mediterranean-climate regions. *Trends in Ecology & Evolution* 11(9): 362–366: doi:10.1016/0169-5347(96)10044-6.
- Cugny C, Mazier F and Galop D (2010) Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): The use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral activity. *Vegetation History and Archaeobotany* 19: 391–408: doi:10.1007/s00334-010-0242-6.
- Curt T, Borgniet L and Bouillon C (2013) Wildfire frequency varies with the size and shape of fuel types in southeastern France: Implications for environmental management. *Journal of Environmental Management* 117: 150–161: doi:10.1016/j.jenvman.2012.12.006.

Curt T and Frejaville T (2018) Wildfire policy in Mediterranean France: how far is it efficient and sustainable? *Risk analysis* 38(3): 472–488.

Curt T, Fréjaville T and Bouillon C (2014) Characterizing pyroregions in south-eastern France. *Advances in forest fire research*. Imprensa da Universidade de Coimbra, 1093–1101. Available at: <https://digitalis.uc.pt/handle/10316.2/34318>: doi:10.14195/978-989-26-0884-6\_119.

Curt T, Fréjaville T and Lahaye S (2016) Modelling the spatial patterns of ignition causes and fire regime features in southern France: implications for fire prevention policy. *International Journal of Wildland Fire* 25(7): 785: doi:10.1071/WF15205.

Curt T, Ganteaume A, Alleaume S, Borgniet L, Chandiox O, Jappiot M, et al. (2007) Vegetation flammability and ignition potential at road-forest interfaces (southern France). *Proceedings of the 4th International Wildland Fire Conference*, 14–18. Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Laurent\\_Borgniet/publication/237343692\\_Vegetation\\_flammability\\_and\\_ignition\\_potential\\_at\\_road-forest\\_interfaces\\_southern\\_France/links/02e7e5295c9be92f48000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Laurent_Borgniet/publication/237343692_Vegetation_flammability_and_ignition_potential_at_road-forest_interfaces_southern_France/links/02e7e5295c9be92f48000000.pdf).

Curt T, Schaffhauser A, Borgniet L, Dumas C, Estève R, Ganteaume A, et al. (2011a) Litter flammability in oak woodlands and shrublands of southeastern France. *Forest Ecology and Management* 261(12): 2214–2222.

Curt T, Schaffhauser A, Borgniet L, Dumas C, Estève R, Ganteaume A, et al. (2011b) Litter flammability in oak woodlands and shrublands of southeastern France. *Forest Ecology and Management* 261(12): 2214–2222.

Cuttelod A, García N, Malak DA, Temple HJ and Katariya V (2009) The Mediterranean: a biodiversity hotspot under threat. *Wildlife in a Changing World—an analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species* 89.

D. Syphard A, C. Volker R, E. Keeley J, J. Hawbaker T, K. Clayton M, I. Stewart S, et al. (2007) Human influence on california fire regimes. *Ecological Applications* 17(5): 1388–1402: doi:10.1890/06-1128.1.

Dai A (2011) Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(1): 45–65: doi:10.1002/wcc.81.

Davis EL, Courtney Mustaphi CJ, Gall A, Pisaric MFJ, Vermaire JC and Moser KA (2016) Determinants of fire activity during the last 3500 yr at a wildland–urban interface, Alberta, Canada. *Quaternary Research*. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0033589416300588>: doi:10.1016/j.yqres.2016.08.006.

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, et al. (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656): 553–597: doi:10.1002/qj.828.



DeLuca TH, MacKenzie MD, Gundale MJ and Holben WE (2006) Wildfire-Produced Charcoal Directly Influences Nitrogen Cycling in Ponderosa Pine Forests. *Soil Science Society of America Journal* 70(2): 448: doi:10.2136/sssaj2005.0096.

Dietre B, Gauthier É and Gillet F (2012) Modern pollen rain and fungal spore assemblages from pasture woodlands around Lake Saint-Point (France). *Review of Palaeobotany and Palynology* 186: 69–89.

Dimitrakopoulos AP, Bemmerzouk AM and Mitsopoulos ID (2011) Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications* 18(1): 83–93.

Dixon P (2003) VEGAN, a package of R functions for community ecology. *Journal of Vegetation Science* 14(6): 927–930.

Dormoy I, Peyron O, Combourieu Nebout N, Goring S, Kotthoff U, Magny M, et al. (2009) Terrestrial climate variability and seasonality changes in the Mediterranean region between 15 000 and 4000 years BP deduced from marine pollen records. *Climate of the Past* 5(4): 615–632.

Drescher-Schneider R, De Beaulieu J-L, Magny M, Walter-Simonnet A-V, Bossuet G, Millet L, et al. (2007) Vegetation history, climate and human impact over the last 15,000 years at Lago dell'Accesa (Tuscany, Central Italy). *Vegetation History and Archaeobotany* 16(4): 279–299.

Duffin KI, Gillson L and Willis KJ (2008) Testing the sensitivity of charcoal as an indicator of fire events in savanna environments: quantitative predictions of fire proximity, area and intensity. *The Holocene* 18(2): 279–291.

Duffy JE (2009) Why biodiversity is important to the functioning of real-world ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7(8): 437–444: doi:10.1890/070195.

Dunnette PV, Higuera PE, McLauchlan KK, Derr KM, Briles CE and Keefe MH (2014) Biogeochemical impacts of wildfires over four millennia in a Rocky Mountain subalpine watershed. *New Phytologist* 203(3): 900–912.

Dupire S, Curt T and Bigot S (2017) Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of The Total Environment* 595: 801–817: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.04.027.

Eastwood WJ, Leng MJ, Roberts N and Davis B (2007) Holocene climate change in the eastern Mediterranean region: a comparison of stable isotope and pollen data from Lake Gölhisar, southwest Turkey. *Journal of Quaternary Science* 22(4): 327–341: doi:10.1002/jqs.1062.

Ejarque A, Miras Y and Riera S (2011) Pollen and non-pollen palynomorph indicators of vegetation and highland grazing activities obtained from modern surface and dung datasets in the eastern Pyrenees. *Review of Palaeobotany and Palynology* 167(1–2): 123–139.

Ellis MB and Ellis JP (1985) *Microfungi on land plants. An identification handbook*. Croom Helm Ltd.

Emberger L (1963) *Bioclimatic map of the Mediterranean zone: explanatory notes*. UNESCO-FAO.

Enache MD and Cumming BF (2006) Tracking recorded fires using charcoal morphology from the sedimentary sequence of Prosser Lake, British Columbia (Canada). *Quaternary Research* 65(2): 282–292: doi:10.1016/j.yqres.2005.09.003.

Enache MD and Cumming BF (2007) Charcoal morphotypes in lake sediments from British Columbia (Canada): an assessment of their utility for the reconstruction of past fire and precipitation. *Journal of Paleolimnology* 38(3): 347–363: doi:10.1007/s10933-006-9084-8.

Etienne D and Jouffroy-Bapicot I (2014) Optimal counting limit for fungal spore abundance estimation using *Sporormiella* as a case study. *Vegetation history and archaeobotany* 23(6): 743–749.

Etienne D, Wilhelm B and Sabatier P (2013) Influences of sampled environments and livestock number on *Sporormiella* abundances in modern samples sediments in French Alps. *Journal of Paleolimnology* 49: 117–127.

Fægri K and Iversen J (1989) *A Textbook of Pollen Analysis*. : doi:10.2307/3038005.

Fægri K, Kaland PE and Krzywinski K (1989) Textbook of pollen analysis. *Textbook of pollen analysis*. (Ed. 4). Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19930670810>.

Faggian P (2018) Estimating fire danger over Italy in the next decades. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 3(1): 15: doi:10.1007/s41207-018-0053-1.

Falk DA and Swetnam TW (2003) Scaling rules and probability models for surface fire regimes in ponderosa pine forests. *USDA Forest Service Proceedings RMRSP-29* 301–318.

Fang J, Zhu J, Wang S, Yue C and Shen H (2011) Global warming, human-induced carbon emissions, and their uncertainties. *Science China Earth Sciences* 54(10): 1458.

Fang L, Yang J, White M and Liu Z (2018) Predicting Potential Fire Severity Using Vegetation, Topography and Surface Moisture Availability in a Eurasian Boreal Forest Landscape. *Forests* 9(3): 130: doi:10.3390/f9030130.

Favre E, Escarguel G, Suc J-P, Vidal G and Thévenod L (2008) A contribution to deciphering the meaning of AP/NAP with respect to vegetation cover. *Review of Palaeobotany and Palynology* 148(1): 13–35: doi:10.1016/j.revpalbo.2007.08.003.

Felde VA, Peglar SM, Bjune AE, Grytnes J-A and Birks HJB (2016) Modern pollen-plant richness and diversity relationships exist along a vegetational gradient in southern Norway. *The Holocene* 26(2): 163–175.

- Fernandes PM (2013) Fire-smart management of forest landscapes in the Mediterranean basin under global change. *Landscape and Urban Planning* 110: 175–182.
- Feurdean A, Florescu G, Vannière B, Tan au I, O’Hara RB, Pfeiffer M, et al. (2017) Fire has been an important driver of forest dynamics in the Carpathian Mountains during the Holocene. *Forest Ecology and Management* 389: 15–26: doi:10.1016/j.foreco.2016.11.046.
- Field CB and Raupach MR (2004) *The global carbon cycle: integrating humans, climate, and the natural world*. Island Press.
- Finsinger W, Colombaroli D, De Beaulieu J-L, Valsecchi V, Vannière B, Vescovi E, et al. (2010) Early to mid-Holocene climate change at Lago dell’Accesa (central Italy): climate signal or anthropogenic bias? *Journal of Quaternary Science* 25(8): 1239–1247.
- Flannigan MD, Stocks BJ and Wotton BM (2000) Climate change and forest fires. *Science of the total environment* 262(3): 221–229.
- Forsyth GG and Van Wilgen BW (2008) The recent fire history of the Table Mountain National Park and implications for fire management. *Koedoe* 50(1): 3–9.
- Fox JF (1979) Intermediate-Disturbance Hypothesis. *Science* 204(4399): 1344–1345: doi:10.1126/science.204.4399.1344.
- Fréjaville T (2015) Vuln rabilit  des forêts de montagne des Alpes occidentales au changement de régime d’incendie. Aix-Marseille. Available at: <http://www.theses.fr/2015AIXM4322>.
- Fréjaville T and Curt T (2015) Spatiotemporal patterns of changes in fire regime and climate: defining the pyroclimates of south-eastern France (Mediterranean Basin). *Climatic Change* 129(1–2): 239–251: doi:10.1007/s10584-015-1332-3.
- Gamisans J (1999) *La végétation de la Corse*. Edisud.
- Ganteaume A, Camia A, Jappiot M, San-Miguel-Ayanz J, Long-Fournel M and Lampin C (2013) A Review of the Main Driving Factors of Forest Fire Ignition Over Europe. *Environmental Management* 51(3): 651–662: doi:10.1007/s00267-012-9961-z.
- Gaussen H and Bagnouls F (1952) L’indice xérothermique. *Bulletin de l’Association de géographes français* 29(222): 10–16.
- Gauthier A, Frisoni G-F and Roché B (1984) *Contribution a la connaissance des lacs d’altitude de la Corse: rapport  d. en mai 1984 par le CRCP pour le Parc Naturel Regional de la Corse*. Parc Naturel Regional de la Corse.
- Gauthier A, Roche B and Frisoni G-F (1983) *Contribution à la connaissance des lacs d’altitudes de Corse*. Parc Naturel Regional de la Corse.



Ghilardi M, Istria D, Curras A, Vacchi M, Contreras D, Vella C, et al. (2017) Reconstructing the landscape evolution and the human occupation of the Lower Sagone River (Western Corsica, France) from the Bronze Age to the Medieval period. *Journal of Archaeological Science: Reports* 12: 741–754.

Giannakopoulos C, Bindi M, Moriondo M, LeSager P and Tin T (2005) *Climate change impacts in the Mediterranean resulting from a 2 C global temperature rise*. A report for WWF.

Giannakopoulos C, Le Sager P, Bindi M, Moriondo M, Kostopoulou E and Goodess CM (2009) Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 C global warming. *Global and Planetary Change* 68(3): 209–224.

Giguet-Covex C, Pansu J, Arnaud F, Rey P-J, Griggo C, Gielly L, et al. (2014) Long livestock farming history and human landscape shaping revealed by lake sediment DNA. *Nature communications* 5: 3211.

Giorgi F (2006) Climate change hot-spots. *Geophysical research letters* 33(8).

Giorgi F and Francisco R (2000) Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change. *Geophysical Research Letters* 27(9): 1295–1298.

Giorgi F, Hewitson B, Christensen J, Hulme M, Von Storch H, Whetton P, et al. (2001) Regional climate information—evaluation and projections. .

Giorgi F and Lionello P (2008a) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63(2): 90–104: doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

Giorgi F and Lionello P (2008b) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63(2–3): 90–104: doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

Giorgi F, Marinucci MR and Visconti G (1992) A 2XCO<sub>2</sub> climate change scenario over Europe generated using a limited area model nested in a general circulation model 2. Climate change scenario. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97(D9): 10011–10028.

Girardin MP and Wotton BM (2009) Summer moisture and wildfire risks across Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48(3): 517–533.

Gordon C, Cooper C, Senior CA, Banks H, Gregory JM, Johns TC, et al. (2000) The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* 16(2): 147–168: doi:10.1007/s003820050010.

Goring S, Lacourse T, Pellatt Marlow G., Mathewes Rolf W. and Austin Amy (2013) Pollen assemblage richness does not reflect regional plant species richness: a cautionary tale. *Journal of Ecology* 101(5): 1137–1145: doi:10.1111/1365-2745.12135.

- Graham RL, Turner MG and Dale VH (1990) How increasing CO<sub>2</sub> and climate change affect forests. *BioScience* 40(8): 575–587.
- Grimm EC (1991) Tilia and Tiliagraph. *Illinois State Museum, Springfield*.
- Grimm EC (2004) TILIA and TGView software, version 2.0. 2. *Illinois State University, Springfield, USA*.
- Guivarch C and Rozenberg J (2013) Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique. .
- Hall NM and Valdes PJ (1997) A GCM simulation of the climate 6000 years ago. *Journal of Climate* 10(1): 3–17.
- He T, Lamont BB and Pausas JG (2019) Fire as a key driver of Earth’s biodiversity. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*: doi:10.1111/brv.12544.
- Hély C, Girardin MP, Ali AA, Carcaillet C, Brewer S and Bergeron Y (2010) Eastern boreal North American wildfire risk of the past 7000 years: A model-data comparison. *Geophysical Research Letters* 37(14).
- Hennessy K, Lucas C, Nicholls N, Bathols J, Suppiah R and Ricketts J (2005) Climate change impacts on fire-weather in south-east Australia. .
- Higuera P (2009) CharAnalysis 0.9: diagnostic and analytical tools for sedimentcharcoal analysis. *User’s Guide, Montana State University, Bozeman, MT*.
- Higuera P and Higher MO (2009) *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis User’s Guide*. .
- Higuera PE, Brubaker LB, Anderson PM, Hu FS and Brown TA (2009) Vegetation mediated the impacts of postglacial climate change on fire regimes in the south-central Brooks Range, Alaska. *Ecological Monographs* 79(2): 201–219.
- Higuera PE, Gavin DG, Bartlein PJ and Hallett DJ (2011) Peak detection in sediment–charcoal records: impacts of alternative data analysis methods on fire-history interpretations. *International Journal of Wildland Fire* 19(8): 996–1014.
- Hodges KI (1996) Spherical Nonparametric Estimators Applied to the UGAMP Model Integration for AMIP. *Monthly Weather Review* 124(12): 2914–2932: doi:10.1175/1520-0493(1996)124<2914:SNEATT>2.0.CO;2.
- Hurlbert S (1971) The Nonconcept of Species Diversity: A Critique and Alternative Parameters. *Ecology* 52(4): 577–586: doi:10.2307/1934145.
- Iglesias V, Vannière B and Jouffroy-Bapicot I (2019) Emergence and Evolution of Anthropogenic Landscapes in the Western Mediterranean and Adjacent Atlantic Regions. *Fire* 2(4): 53.
- Janny F and Costa LJ (2004)  volution et transformation des industries lithiques taill es et polies durant le Chalcolithique et l’ ge du Bronze en Corse. *L’Anthropologie* 108(1): 111–119: doi:10.1016/j.anthro.2004.01.004.

Jensen K, Lynch EA, Calcote R and Hotchkiss SC (2007) Interpretation of charcoal morphotypes in sediments from Ferry Lake, Wisconsin, USA: do different plant fuel sources produce distinctive charcoal morphotypes? *The Holocene* 17(7): 907–915: doi:10.1177/0959683607082405.

Joffre R, Rambal S and Ratte J-P (1999) The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic. *Agroforestry systems* 45(1–3): 57–79.

Jones PD, Osborn TJ and Briffa KR (1997) Estimating sampling errors in large-scale temperature averages. *Journal of Climate* 10(10): 2548–2568.

Jouffroy-Bapicot I, Vannière B, Gauthier  , Richard H, Monna F and Petit C (2013) 7000 years of vegetation history and land-use changes in the Morvan Mountains (France): A regional synthesis. *The Holocene* 23(12): 1888–1902.

Joussaume S and Taylor KE (1995) Status of the paleoclimate modeling intercomparison project (PMIP). *World Meteorological Organization-Publications-WMO TD* 425–430.

Keeley JE (2009) Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* 18(1): 116: doi:10.1071/WF07049.

Keeley JE and Zedler PH (2009) Large, high-intensity fire events in southern California shrublands: debunking the fine-grain age patch model. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America* 19(1): 69–94.

Kittel TGF, Giorgi F and Meehl GA (1997) Intercomparison of regional biases and doubled CO<sub>2</sub>-sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments. *Climate Dynamics* 14(1): 1–15.

Knaap WO van der (2009) Estimating pollen diversity from pollen accumulation rates: a method to assess taxonomic richness in the landscape. *The Holocene* 19(1): 159–163: doi:10.1177/0959683608098962.

Knutti R and Sedl cek J (2013) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change* 3(4): 369.

Köppen WP (1923) *Die klimate der erde: Grundriss der klimakunde*. Walter de Gruyter.

Kutiel P and Naveh Z (1987a) The effect of fire on nutrients in a pine forest soil. *Plant and Soil* 104(2): 269–274: doi:10.1007/BF02372541.

Kutiel P and Naveh Z (1987b) Soil properties beneath *Pinus halepensis* and *Quercus calliprinos* trees on burned and unburned mixed forest on Mt. Carmel, Israel. *Forest Ecology and Management* 20(1–2): 11–24.

Lacan M (2011) La n olithisation du bassin méditerranéen : apports de l'ADN ancien. phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier. Available at: <http://thesesups.ups-tlse.fr/1392/>.

Ladd P. G., Crosti R. and Pignatti S. (2004) Vegetative and seedling regeneration after fire in planted Sardinian pinewood compared with that in other areas of Mediterranean-type climate. *Journal of Biogeography* 32(1): 85–98: doi:10.1111/j.1365-2699.2004.01168.x.

Lahaye S, Curt T, Fréjaville T, Sharples J, Paradis L and Hély C (2018a) What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International Journal of Wildland Fire* 27(3): 155–163: doi:10.1071/WF17087.

Lahaye S, Curt T, Fréjaville T, Sharples J, Paradis L and Hély C (2018b) What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? *International journal of wildland fire* 27(3): 155–163.

Lahaye S, Curt T, Paradis L and Hély C (2014) *Classification of large wildfires in South-Eastern France to adapt suppression strategies*. Imprensa da Universidade de Coimbra. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01128654/>.

Lau WK-M, Wu H-T and Kim K-M (2013) A canonical response of precipitation characteristics to global warming from CMIP5 models. *Geophysical Research Letters* 40(12): 3163–3169.

Lenihan JM, Drapek R, Bachelet D and Neilson RP (2003) Climate change effects on vegetation distribution, carbon, and fire in California. *Ecological applications* 13(6): 1667–1681.

Lepš J and Šmilauer P (2003) *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Cambridge university press.

Lestienne M, C. Aleman J and Colombaroli D (2017) How Paleofire Research Can Better Inform Ecosystem Management. *Earth & Space Science News (EOS)* 99(8): 12.

Lestienne M, Hély C, Curt T, Jouffroy-Bapicot I and Vannièrè B (2019a) Combining the Monthly Drought Code and Paleoecological data to assess the Holocene climate impact on Mediterranean fire regimes. *Fire in revision*.

Lestienne M, Jouffroy-Bapicot I, Leyssenne D, Sabatier P, Debret M, Albertini P-J, et al. (2019b) Fires and human activities as key factors of the high diversity of Corsican vegetation. *The Holocene*: doi:10.1177/0959683619883025.

Leys B (2012) Facteurs explicatifs de la dynamique des végétations au cours de l'Holocène en système montagnard méditerranéen et alpin: climat et perturbation feu. EPHE. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/235915397\\_Facteurs\\_explicatifs\\_de\\_la\\_dynamique\\_des\\_vegetations\\_au\\_cours\\_de\\_l%27Holocene\\_en\\_systeme\\_montagnard\\_mediterraneen\\_et\\_alpin\\_climat\\_et\\_perturbation\\_feu](https://www.researchgate.net/publication/235915397_Facteurs_explicatifs_de_la_dynamique_des_vegetations_au_cours_de_l%27Holocene_en_systeme_montagnard_mediterraneen_et_alpin_climat_et_perturbation_feu).

Leys B, Carcaillet C, Dezileau L, Ali AA and Bradshaw RHW (2013) A comparison of charcoal measurements for reconstruction of Mediterranean paleo-fire frequency in the mountains of Corsica. *Quaternary Research* 79(3): 337–349: doi:10.1016/j.yqres.2013.01.003.

Leys B, Curt T and Elkin C (2018a) Mosaic Landscape Pattern Explains Vegetation Resistance to High Fire Frequency in Corsica over the Last Six Millennia. *Int J Earth Sci Geophys* 4: 017.

Leys B, Curt T and Elkin C (2018b) Mosaic Landscape Pattern Explains Vegetation Resistance to High Fire Frequency in Corsica over the Last Six Millennia. *Int J Earth Sci Geophys* 4: 017.

Leys B, Finsinger W and Carcaillet C (2014) Historical range of fire frequency is not the Achilles' heel of the Corsican black pine ecosystem. *Journal of ecology* 102(2): 381–395.

Leys BA, Commerford JL and McLauchlan KK (2017) Reconstructing grassland fire history using sedimentary charcoal: Considering count, size and shape. *PLOS ONE* 12(4): e0176445: doi:10.1371/journal.pone.0176445.

Li Y, Zhao J, Guo X, Zhang Z, Tan G and Yang J (2017) The Influence of Land Use on the Grassland Fire Occurrence in the Northeastern Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Sensors* 17(3): 437: doi:10.3390/s17030437.

Li Y, Zhou L and Cui H (2008) Pollen indicators of human activity. *Chinese Science Bulletin* 53(9): 1281: doi:10.1007/s11434-008-0181-0.

Listopad CMCS, Köbel M, Príncipe A, Gonçalves P and Branquinho C (2018) The effect of grazing exclusion over time on structure, biodiversity, and regeneration of high nature value farmland ecosystems in Europe. *Science of The Total Environment* 610–611: 926–936: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.018.

Lloret F and López-Soria L (1993) Resprouting of *Erica multiflora* after experimental fire treatments. *Journal of Vegetation Science* 4(3): 367–374.

Lloret F, Siscart D and Dalmases C (2004) Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). *Global Change Biology* 10(12): 2092–2099.

Lohman DJ, Bickford D and Sodhi NS (2007) The burning issue. *Science* 316(5823): 376–376.

Magnan A, Hamilton J, Rosselló J, Billé R and Bujosa A (2013) Mediterranean tourism and climate change: Identifying future demand and assessing destinations' vulnerability. *Regional assessment of climate change in the Mediterranean*. Springer, 337–365.

Magny M, Combourieu-Nebout N, De Beaulieu JL, Bout-Roumazeilles V, Colombaroli D, Desprat S, et al. (2013) North-south palaeohydrological contrasts in the central Mediterranean during the Holocene: tentative synthesis and working hypotheses. *Climate of the Past Discussions* 9: 1901–1967.

Magny M, De Beaulieu J-L, Drescher-Schneider R, Vannièrè B, Walter-Simonnet A-V, Miras Y, et al. (2007) Holocene climate changes in the central Mediterranean as recorded by lake-level fluctuations at Lake Accessa (Tuscany, Italy). *Quaternary Science Reviews* 26(13–14): 1736–1758.



- Médail F (2017) The specific vulnerability of plant biodiversity and vegetation on Mediterranean islands in the face of global change. *Regional Environmental Change* 17(6): 1775–1790.
- Medail F and Quezel P (1997) Hot-spots analysis for conservation of plant biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 112–127.
- Médail F and Verlaque R (1997) Ecological characteristics and rarity of endemic plants from southeast France and Corsica: Implications for biodiversity conservation. *Biological Conservation* 80(3): 269–281: doi:10.1016/S0006-3207(96)00055-9.
- Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma MLT, Lamarque J-F, et al. (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109(1): 213: doi:10.1007/s10584-011-0156-z.
- Meltsov V, Poska A, Odgaard BV, Sammul M and Kull T (2011) Palynological richness and pollen sample evenness in relation to local floristic diversity in southern Estonia. *Review of Palaeobotany and Palynology* 166(3–4): 344–351: doi:10.1016/j.revpalbo.2011.06.008.
- Moreira F, Viedma O, Arianoutsou M, Curt T, Koutsias N, Rigolot E, et al. (2011) Landscape – wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *Journal of Environmental Management* 92(10): 2389–2402: doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.028.
- Morelli L and Francalacci P (2000a) The Population History of Corsica and Sardinia: the Contribution of Archaeology and Genetics. *Archaeogenetics: DNA and the Population Prehistory of Europe* 185.
- Morelli L and Francalacci P (2000b) The Population History of Corsica and Sardinia: the Contribution of Archaeology and Genetics. *Archaeogenetics: DNA and the Population Prehistory of Europe* 185.
- Moretti J-L (2007) Tourisme et aménagement du territoire en Corse : La recherche de l'optimum: (un pari pour une Corse nouvelle). thesis, Corte. Available at: <http://www.theses.fr/2007CORT0040>.
- Moriondo M, Good P, Durao R, Bindi M, Giannakopoulos C and Corte-Real J (2006) Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research* 31(1): 85–95.
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282): 747–756: doi:10.1038/nature08823.
- Moss RH, Nakicenovic N and O'Neill BC (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Geneva: IPCC. Available at: <http://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-report-scenarios.pdf>.

Mouillot F and Field CB (2005) Fire history and the global carbon budget: a 1 degrees x 1 degrees fire history reconstruction for the 20th century. *Global Change Biology* 11(3): 398–420: doi:10.1111/j.1365-2486.2005.00920.x.

Mouillot F, Paradis G, Andrei-Ruiz M-C and Quilichini A (2008) Corsica. *Mediterranean Island Landscapes*. Springer, 220–244.

Mouillot F, Rambal S and Joffre R (2002) Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. *Global Change Biology* 8(5): 423–437.

Mouillot F, Ratte J-P, Joffre R, Moreno JM and Rambal S (2003) Some determinants of the spatio-temporal fire cycle in a mediterranean landscape (Corsica, France). *Landscape Ecology* 18(7): 665–674: doi:10.1023/B:LAND.0000004182.22525.a9.

Mouillot F, Ratte J-P, Joffre R, Mouillot D and Rambal and S (2005) Long-term forest dynamic after land abandonment in a fire prone Mediterranean landscape (central Corsica, France). *Landscape Ecology* 20(1): 101–112: doi:10.1007/s10980-004-1297-5.

Murphy DM, Chow JC, Leibensperger EM, Malm WC, Pitchford M, Schichtel BA, et al. (2011) Decreases in elemental carbon and fine particle mass in the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11(10): 4679–4686.

Mustaphi CJC and Pisaric MFJ (2014) A classification for macroscopic charcoal morphologies found in Holocene lacustrine sediments. *Progress in Physical Geography* 38(6): 734–754: doi:10.1177/0309133314548886.

Myers N, Mittermeier RA, Mittermeier CG, Fonseca GAB da and Kent J (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403(6772): 853: doi:10.1038/35002501.

N. Rhodes A (1998) A method for the preparation and quantification of microscopic charcoal from terrestrial and lacustrine sediment cores. *Holocene* 8: 113–117: doi:10.1191/095968398671104653.

Naito K and Oguma H (2017) Tensile properties of novel carbon/glass hybrid thermoplastic composite rods. *Composite Structures* 161: 23–31.

Noble IR and Slatyer RO (1980) The use of vital attributes to predict successional changes in plant communities subject to recurrent disturbances. *Vegetatio* 43(1–2): 5–21.

Nogué S, Nascimento L de, Froyd CA, Wilmshurst JM, Boer EJ de, Coffey EED, et al. (2017) Island biodiversity conservation needs palaeoecology. *Nature Ecology & Evolution* 1(7): 0181: doi:10.1038/s41559-017-0181.

Norman M (2003) Biodiversity hotspots revisited. *BioScience* 53(10): 916–917.

Odgaard BV (2001) Fossil pollen as a record of past biodiversity. *Journal of Biogeography* 26(1): 7–17: doi:10.1046/j.1365-2699.1999.00280.x.

- Odgaard BV (2006) Biodiversity of past plant cover. *Encyclopedia of Quaternary science*. Pergamon Press, 2511–2515.
- Pachauri RK and Reisinger A (2007) IPCC fourth assessment report. *IPCC, Geneva* 2007.
- Patterson WA, Edwards KJ and Maguire DJ (1987) Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews* 6(1): 3–23.
- Pausas JG (1999) Response of plant functional types to changes in the fire regime in Mediterranean ecosystems: a simulation approach. *Journal of vegetation Science* 10(5): 717–722.
- Pausas JG (2004) Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic change* 63(3): 337–350.
- Pausas JG (2006) Simulating Mediterranean landscape pattern and vegetation dynamics under different fire regimes. *Plant Ecology* 187(2): 249–259.
- Pausas JG (2015) Bark thickness and fire regime. *Functional Ecology* 29(3): 315–327.
- Pausas JG and Fernández-Muñoz S (2012) Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change* 110(1–2): 215–226: doi:10.1007/s10584-011-0060-6.
- Pausas JG, Llovet J, Rodrigo A and Vallejo R (2009a) Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review. *International Journal of Wildland Fire* 17(6): 713–723: doi:10.1071/WF07151.
- Pausas JG, Llovet J, Rodrigo A and Vallejo R (2009b) Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? – A review. *International Journal of Wildland Fire* 17(6): 713–723: doi:10.1071/WF07151.
- Pausas JG and Paula S (2012) Fuel shapes the fire–climate relationship: evidence from Mediterranean ecosystems. *Global Ecology and Biogeography* 21(11): 1074–1082.
- Pausas JG and Ribeiro E (2017) Fire and plant diversity at the global scale. *Global Ecology and Biogeography* 26(8): 889–897.
- Pausas JG and Ribeiro E (n.d.) Fire and plant diversity at the global scale. *Global Ecology and Biogeography* 26(8): 889–897: doi:10.1111/geb.12596.
- Pausas JG and Vallejo VR (1999) The role of fire in European Mediterranean ecosystems. *Remote sensing of large wildfires*. Springer, 3–16.
- Pereira H (2011) *Cork: biology, production and uses*. Elsevier.
- Piñol J, Terradas J and Lloret F (1998) Climate Warming, Wildfire Hazard, and Wildfire Occurrence in Coastal Eastern Spain. *Climatic Change* 38(3): 345–357: doi:10.1023/A:1005316632105.



Planton S, DRIOUECH F, Rhaz KE and LIONELLO P (2012) The climate of the Mediterranean regions in the future climate projections. *The Mediterranean Region under Climate Change* 83.

Poulain X, Lefevre V, Lopez-Pamies O and Ravi-Chandar K (2017) Damage in elastomers: nucleation and growth of cavities, micro-cracks, and macro-cracks. *International Journal of Fracture* 205(1): 1–21.

Pozzi AC, Roy M, Nagati M, Schwob G, Manzi S, Gardes M, et al. (2018) Patterns of diversity, endemism and specialization in the root symbiont communities of alder species on the island of Corsica. *New Phytologist*.

Price C and Rind D (1994) Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 99(D5): 10823–10831.

Prométhée ( (n.d.) ). Available at: <http://www.promethee.com/>.

Quezel P (1999) Les grandes structures de végétation en région méditerranéenne: Facteurs déterminants dans leur mise en place post-glaciaire. *Geobios* 32(1): 19–32: doi:10.1016/S0016-6995(99)80081-3.

Radke LF, Hegg DA, Hobbs PV, Nance JD, Lyons JH, Laursen KK, et al. (1991) Particulate and trace gas emissions from large biomass fire in North America. In *Levine, JS (ed.) Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. pp. 209-216* 209–216.

Ramstein G, Kageyama M, Guiot J, Wu H, Hély C, Krinner G, et al. (2007) How cold was Europe at the Last Glacial Maximum? A synthesis of the progress achieved since the first PMIP model-data comparison. *Climate of the Past* 3(2): 331–339: doi:<https://doi.org/10.5194/cp-3-331-2007>.

Rashid GH (1987) Effects of fire on soil carbon and nitrogen in a Mediterranean oak forest of Algeria. *Plant and Soil* 103(1): 89–93.

R.Core Team (2018) R: A Language and Environment for Statistical Computing. .

Reille M (1992a) New pollen-analytical researches in Corsica: the problem of *Quercus ilex* L. and *Erica arborea* L., the origin of *Pinus halepensis* Miller forests. *New Phytologist* 122(2): 359–378.

Reille M (1992b) Pollen et Spores D'Europe et D'Afrique du Nord. *Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie*.

Reille M, Gamisans J, Andrieu-Ponel V and De Beaulieu J-L (1999) The Holocene at Lac de Creno, Corsica, France: a key site for the whole island. *The New Phytologist* 141(2): 291–307.

Reille M, Gamisans J, de BEAULIEU J-L and Andrieu V (1997) The late-glacial at Lac de Creno (Corsica, France): a key site in the western Mediterranean basin. *New Phytologist* 135(3): 547–559: doi:10.1046/j.1469-8137.1997.00683.x.

Renssen H, Seppä H, Crosta X, Goosse H and Roche DM (2012) Global characterization of the Holocene Thermal Maximum. *Quaternary Science Reviews* 48: 7–19: doi:10.1016/j.quascirev.2012.05.022.

Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, et al. (2011) RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109(1): 33: doi:10.1007/s10584-011-0149-y.

Richez G (1996) Sustaining local cultural identity: social unrest and tourism in Corsica. *Sustainable tourism? European experiences*. 176–188.

Robinson SA, Black S, Sellwood BW and Valdes PJ (2006) A review of palaeoclimates and palaeoenvironments in the Levant and Eastern Mediterranean from 25,000 to 5000 years BP: setting the environmental background for the evolution of human civilisation. *Quaternary Science Reviews* 25(13): 1517–1541: doi:10.1016/j.quascirev.2006.02.006.

Roche B and Loye-Pilot MD (1989) Eutrophisation récente d'un lac de montagne sans occupation humaine (lac de Bastani, Corset : Conséquence d'agents atmosphériques? *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science* 2(4): 681–707: doi:10.7202/705049ar.

Rosa EA and Dietz T (2012) Human drivers of national greenhouse-gas emissions. *Nature Climate Change* 2(8): 581.

Rossignol-Strick M and Paterne M (1999) (Table 1) Comparison of three chronologies for the sapropel series of cores KC01-KC01b. *Supplement to: Rossignol-Strick, M; Paterne, M (1999): A synthetic pollen record of the eastern Mediterranean sapropels of the last 1 Ma: implications for the time-scale and formation of sapropels. Marine Geology, 153(1-4), 221-237, [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00080-2](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00080-2). Available at: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.790758>: doi:<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.790758>.*

Rothermel RC; (1983) *How to predict the spread and intensity of forest and range fires*. . Available at: <https://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/24635>.

Rowell DP and Jones RG (2006) Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. *Climate Dynamics* 27(2–3): 281–299.

Ruffault J (2012) Sècheresse et incendies en Languedoc-Roussillon dans un contexte de changements globaux - approche régionale par modélisation-. Thèse de doctorat, Université de Montpellier. Available at: [http://www.biu-montpellier.fr/florabium/servlet/DocumentFileManager?source=ged&document=ged:IDOCs:17657&resolution=&recordId=theses%3ABIU\\_THESE%3A1070&file=](http://www.biu-montpellier.fr/florabium/servlet/DocumentFileManager?source=ged&document=ged:IDOCs:17657&resolution=&recordId=theses%3ABIU_THESE%3A1070&file=).

Ruffault J, Curt T, St-Paul NM, Moron V and Trigo RM (2017a) Extreme Wildfire occurrence in response to Global Change type Droughts in the Northern Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 1–21.

Ruffault J, Moron V, Trigo RM and Curt T (2016) Objective identification of multiple large fire climatologies: an application to a Mediterranean ecosystem. *Environmental Research Letters* 11(7): 075006.

Ruffault J, Moron V, Trigo RM and Curt T (2017b) Daily synoptic conditions associated with large fire occurrence in Mediterranean France: evidence for a wind-driven fire regime: DAILY SYNOPTIC CONDITIONS ASSOCIATED WITH LARGE FIRE OCCURRENCE. *International Journal of Climatology* 37(1): 524–533: doi:10.1002/joc.4680.

Rundel PW, Montenegro G and Jaksic FM (2013) *Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean-type ecosystems*. Springer Science & Business Media.

Sá ACL, Benali A, Fernandes PM, Pinto RMS, Trigo RM, Salis M, et al. (2017) Evaluating fire growth simulations using satellite active fire data. *Remote Sensing of Environment* 190: 302–317: doi:10.1016/j.rse.2016.12.023.

Säid S (2002) Floristic and life form diversity in post-pasture successions on a Mediterranean island (Corsica). *Plant Ecology* 162(1): 67–76.

Saitta A, Anslan S, Bahram M, Brocca L and Tedersoo L (2018) Tree species identity and diversity drive fungal richness and community composition along an elevational gradient in a Mediterranean ecosystem. *Mycorrhiza* 28(1): 39–47: doi:10.1007/s00572-017-0806-8.

Salvador R, Lloret F, Pons X and Pinol J (2005) Does fire occurrence modify the probability of being burned again? A null hypothesis test from Mediterranean ecosystems in NE Spain. *Ecological Modelling* 188(2–4): 461–469.

Samartin S, Heiri O, Joos F, Renssen H, Franke J, Brönnimann S, et al. (2017) Warm Mediterranean mid-Holocene summers inferred from fossil midge assemblages. *Nature Geoscience* 10(3): 207–212: doi:10.1038/ngeo2891.

San Roman Sanz A, Fernandez C, Mouillot F, Ferrat L, Istria D and Pasqualini V (2013a) Long-Term Forest Dynamics and Land-Use Abandonment in the Mediterranean Mountains, Corsica, France. *Ecology and Society* 18(2). Available at: <https://www.jstor.org/stable/26269315>.

San Roman Sanz A, Fernandez C, Mouillot F, Ferrat L, Istria D and Pasqualini V (2013b) Long-Term Forest Dynamics and Land-Use Abandonment in the Mediterranean Mountains, Corsica, France. *Ecology and Society* 18(2). Available at: <https://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss2/art38/>: doi:10.5751/ES-05556-180238.

Schaffhauser A (2009) *Impacts de la récurrence des incendies sur la végétation, son inflammabilité et sa combustibilité. Application à la Provence cristalline (Massif des Maures, Var, France)*. Aix-Marseille 3. Available at: <http://www.theses.fr/2009AIX30008>.

Schunk C, Wastl C, Leuchner M and Menzel A (2017) Fine fuel moisture for site- and species-specific fire danger assessment in comparison to fire danger indices. *Agricultural and Forest Meteorology* 234: 31–47.

Schwitalla AD, Bötzel F, Zimmermann T, Sütel M and Müller W-D (2017) The impact of argon/oxygen low-pressure plasma on shear bond strength between a veneering composite and different PEEK materials. *Dental Materials* 33(9): 990–994.

Sedlar Z, Alegro A, Radović A, Brigić A and Hršak V (2018) Extreme land-cover and biodiversity change as an outcome of land abandonment on a Mediterranean island (eastern Adriatic). *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology* 152(4): 728–737: doi:10.1080/11263504.2017.1330774.

Sheffield J and Wood EF (2008a) Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics* 31(1): 79–105.

Sheffield J and Wood EF (2008b) Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics* 31(1): 79–105.

Shiogama H, Nozawa T and Emori S (2007) Robustness of climate change signals in near term predictions up to the year 2030: Changes in the frequency of temperature extremes. *Geophysical Research Letters* 34(12).

Simard I, Morin H and Potelle B (2002) A new paleoecological approach to reconstruct long-term history of spruce budworm outbreaks. *Canadian Journal of Forest Research* 32(3): 428–438.

Somot S (2005) Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique. .

Sonia S, Morin H and Krause C (2011) Long-term spruce budworm outbreak dynamics reconstructed from subfossil trees. *Journal of Quaternary Science* 26(7): 734–738.

Spearman C (1904) The proof and measurement of association between two things. *The American journal of psychology* 15(1): 72–101.

Stein A, Gerstner K and Kreft H (2014) Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. *Ecology letters* 17(7): 866–880.

Stephens SL, Agee JK, Fule PZ, North MP, Romme WH, Swetnam TW, et al. (2013) Managing forests and fire in changing climates. *Science* 342(6154): 41–42.

Stocks BJ, Lynham TJ, Lawson BD, Alexander ME, Wagner CEV, McAlpine RS, et al. (1989) Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *The Forestry Chronicle* 65(4): 258–265: doi:10.5558/tfc65258-4.

Ter Braak CJ and Smilauer P (2002) *CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5)*. www.canoco.com.

Thomson AM, Calvin KV, Smith SJ, Kyle GP, Volke A, Patel P, et al. (2011) RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change* 109(1): 77: doi:10.1007/s10584-011-0151-4.

Thornthwaite CW and Mather JR (1955) The Water Budget and Its Use in Irrigation.

Tinner W, Conedera M, Ammann B and Lotter AF (2005) Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *The Holocene* 15(8): 1214–1226: doi:10.1191/0959683605hl892rp.

Tinner W, van Leeuwen JF, Colombaroli D, Vescovi E, van der Knaap WO, Henne PD, et al. (2009) Holocene environmental and climatic changes at Gorgo Basso, a coastal lake in southern Sicily, Italy. *Quaternary Science Reviews* 28(15–16): 1498–1510.

Tinner W, Vescovi E, van Leeuwen JFN, Colombaroli D, Henne PD, Kaltenrieder P, et al. (2016) Holocene vegetation and fire history of the mountains of Northern Sicily (Italy). *Vegetation History and Archaeobotany* 25(5): 499–519: doi:10.1007/s00334-016-0569-8.

Traveset A, Brundu G, Carta L, Mprezetou I, Lambdon P, Manca M, et al. (2008) Consistent performance of invasive plant species within and among islands of the Mediterranean basin. *Biological invasions* 10(6): 847–858.

Tsiafouli MA, Thébault E, Sgardelis SP, De Ruiter PC, Van Der Putten WH, Birkhofer K, et al. (2015) Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global change biology* 21(2): 973–985.

Umbanhowar CE and McGrath MJ (1998) Experimental production and analysis of microscopic charcoal from wood, leaves and grasses. *The Holocene* 8(3): 341–346: doi:10.1191/095968398666496051.

Underwood EC, Viers JH, Klausmeyer KR, Cox RL and Shaw MR (2009) Threats and biodiversity in the mediterranean biome. *Diversity and Distributions* 15(2): 188–197.

Valdes PJ, Armstrong E, Badger MPS, Bradshaw CD, Bragg F, Crucifix M, et al. (2017) The BRIDGE HadCM3 family of climate models: HadCM3@Bristol v1.0. *Geoscientific Model Development* 10(10): 3715–3743: doi:https://doi.org/10.5194/gmd-10-3715-2017.

Van Geel B (2002) Non-pollen palynomorphs. *Tracking environmental change using lake sediments*. Springer, 99–119.

van Geel B (2006) Non-Pollen Palynomorphs. *Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*, 99–119: doi:10.1007/0-306-47668-1\_6.

Van Geel B and Aptroot A (2006) Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. *Nova Hedwigia* 82(3–4): 313–329.

van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1): 5: doi:10.1007/s10584-011-0148-z.

Van Wagner CE (1987) *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Ottawa: Canada Communication Group Publ.



- Vannièrè B, Blarquez O, Rius D, Doyen E, Brücher T, Colombaroli D, et al. (2016) 7000-year human legacy of elevation-dependent European fire regimes. *Quaternary Science Reviews* 132: 206–212: doi:10.1016/j.quascirev.2015.11.012.
- Vannièrè B, Bossuet G, Walter-Simonnet A-V, Gauthier E, Barral P, Petit C, et al. (2003) Land use change, soil erosion and alluvial dynamic in the lower Doubs Valley over the 1st millenium AD (Neublans, Jura, France). *Journal of Archaeological Science* 30(10): 1283–1299.
- Vannièrè B, Colombaroli D, Chapron E, Leroux A, Tinner W and Magny M (2008) Climate versus human-driven fire regimes in Mediterranean landscapes: the Holocene record of Lago dell'Accesa (Tuscany, Italy). *Quaternary Science Reviews* 27(11): 1181–1196: doi:10.1016/j.quascirev.2008.02.011.
- Vannièrè B and Martineau R (2005) Histoire des feux et pratiques agraires du Néolithique à l'âge du Fer en région Centre: implications territoriales, démographiques et environnementales. *Gallia préhistoire* 47(1): 167–186.
- Vannièrè B, Power MJ, Roberts N, Tinner W, Carrion J, Magny M, et al. (2011) Circum-Mediterranean fire activity and climate changes during the mid-Holocene environmental transition (8500-2500 cal. BP). *The Holocene* 21(1): 53–73: doi:10.1177/0959683610384164.
- Vera C, Silvestri G, Liebmann B and González P (2006) Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters* 33(13).
- Viegas DX, Bovio G, Ferreira A, Nosenzo A and Sol B (1999) Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of wildland fire* 9(4): 235–246.
- Vogiatzakis IN, Mannion AM and Sarris D (2016) Mediterranean island biodiversity and climate change: the last 10,000 years and the future. *Biodiversity and conservation* 25(13): 2597–2627.
- Wagner CEV, Forest P, Station E, Ontario CR, Français RUE and Davis HJ (1987) Development and Structure of the Canadian Forest FireWeather Index System. *Can. For. Serv., Forestry Tech. Rep.*
- Wagner CV (1969) A simple fire-growth model. *The Forestry Chronicle* 45(2): 103–104.
- Watanabe M, Suzuki T, O'ishi R, Komuro Y, Watanabe S, Emori S, et al. (2010) Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate* 23(23): 6312–6335: doi:10.1175/2010JCLI3679.1.
- Watanabe S, Hajima T, Sudo K, Nagashima T, Takemura T, Okajima H, et al. (2011) MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development* 4(4): 845.

Weng C, Hooghiemstra H and Duivenvoorden JF (2006) Challenges in estimating past plant diversity from fossil pollen data: statistical assessment, problems, and possible solutions. *Diversity and distributions* 12(3): 310–318.

Westerling A, Hidalgo H, Cayan D and Swetnam T (2006a) Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *Science* 313(5789): 940–943: doi:10.1126/science.1130691.

Westerling AL, Hidalgo HG, Cayan DR and Swetnam TW (2006b) Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. *science* 313(5789): 940–943.

Whelan RJ (1995) *The ecology of fire*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press.

Whitlock C, Colombaroli D, Conedera M and Tinner W (2018) Land-use history as a guide for forest conservation and management. *Conservation Biology* 32(1): 84–97: doi:10.1111/cobi.12960.

Whitlock C and Larsen C (2002) Charcoal as a fire proxy. *Tracking environmental change using lake sediments*. Springer, 75–97.

Wick L, Lemcke G and Sturm M (2003) Evidence of Lateglacial and Holocene climatic change and human impact in eastern Anatolia: high-resolution pollen, charcoal, isotopic and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. *The Holocene* 13(5): 665–675.

Wilkinson DM (1999) The disturbing history of intermediate disturbance. *Oikos* 145–147.

Wu R, Chen J and Wen Z (2013) Precipitation-surface temperature relationship in the IPCC CMIP5 models. *Advances in Atmospheric Sciences* 30(3): 766–778.

YiMin TZBYY, Bo LWZLL, WenMin WPLZG, HaiLong MQBAD, JianDong LXCBBH, LiXia LLZXW, et al. (2018) The FGOALS climate system model as a modeling tool for supporting climate sciences: An overview. *Earth and Planetary Physics* (4): 2.

Zeder MA (2008) Domestication and early agriculture in the Mediterranean Basin: Origins, diffusion, and impact. *Proceedings of the national Academy of Sciences* 105(33): 11597–11604.



*On ne voit bien qu'avec le cœur.  
L'essentiel est invisible pour les yeux.  
Antoine de St Exupéry*





## RESUME

Au sein du Bassin Méditerranéen, la Corse abrite les écosystèmes parmi les mieux préservés en termes de richesse d'habitats et de type de végétation. C'est également la région française la plus touchée par les feux de forêt. Ces dernières années la déprise pastorale et le réchauffement climatique ont très fortement augmenté la probabilité d'occurrence et de propagation des feux. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse vise à approfondir la compréhension des causes et mécanismes du régime de feu en Corse au cours de l'Holocène et d'en proposer une lecture prospective. Les résultats de ce travail montrent que les feux dès le début de l'Holocène participent à la construction et la diversification de l'écosystème méditerranéen. Il y a 6000 à 5000 ans, alors que les conditions climatiques sont moins favorables au déclenchement et à la propagation des feux de forêt, les activités agro-pastorales utilisant le feu sont les principaux agents du développement de l'exceptionnelle biodiversité actuellement établie en Corse. Ce travail propose aussi l'utilisation du MDC (indice mensuel de sécheresse) pour reconstruire les conditions climatiques de l'aléa incendie au cours de l'Holocène et ainsi établir des valeurs de référence dans des contextes environnementaux connus. Du point de vue de cet indice, le début de l'Holocène est caractérisé par un climat plus aride qu'aujourd'hui, avec un ensoleillement plus fort également qui explique un régime de feu soutenu à cette période. Toutefois, la durée de la saison de feu (FSL) restait limitée à une centaine de jours. Quels que soient les scénarii d'évolution des conditions climatiques pour le siècle en cours proposés par le GIEC, les dangers de feu calculés à partir du MDC et de la FSL augmentent fortement. Le MDC retrouve des valeurs comparables au début de l'Holocène sans toutefois les dépasser alors que la durée de la saison de feu (FSL) doit largement s'étendre au-delà des durées enregistrées par le passé. Nous serons alors confrontés pour la première fois à une augmentation simultanée de la sécheresse (intensité et surtout sa durée en nombre de jours) et des activités humaines, ce qui aura pour conséquence un accroissement sans précédent de l'aléa et du risque de feu.

## MOTS CLEFS

Régimes de feux, Méditerranée, paléoécologie, modélisation, biodiversité, réchauffement climatique

## ABSTRACT

In the Mediterranean Basin, Corsica houses some of the best preserved ecosystems in terms of habitat richness and vegetation type. It is also the French region the most affected by forest fires. Recent years of pastoral spending and global warming have greatly increased the probability of occurrence and spread of fire. In this context, the purpose of this thesis is to understand the causes and mechanisms of the fire regime in Corsica during the Holocene and to propose a prospective reading. The results of this work are those that started from the beginning of the Holocene and contributed to the diversification and diversification of the Mediterranean ecosystem. 6,000 to 5,000 years ago, when climatic conditions are less favourable for propagation and forest fires, agro-pastoral activities using the main agents of development of the disaster, are currently in Corsica. This work also proposes the use of the MDC to reconstruct the climatic conditions of fire hazard during the Holocene and thus define the reference values in known environmental contexts. On the way of this place, one begins to be Holocene with a climate earlier today, with sunshine and strong also that explains a fire regime passed at this time. However, the duration of the fire season (FSL) was limited to a hundred days. Whatever the evolution of climatic conditions scenario proposed by the IPCC for the current century, fire hazards calculated from the MDC and the FSL strongly increase. The MDC found comparable values at the beginning of the Holocene without being exceeded while the duration of the fire season (FSL) extended well beyond durations. We will then face the first time with a simultaneous increase in drought and human activities, which will increase the number of unprecedented days.

## KEYWORDS

Fire regimes, Mediterranean, paleoecology, modelling, biodiversity, global change