



Faculté des Lettres et Sciences Humaines
Institut de Géographie

Impacts des changements climatiques sur le vignoble neuchâtelois : étude des indices bioclimatiques déterminants

Thèse présentée pour l'obtention du grade de docteur ès sciences humaines,
spécialité climatologie appliquée

Valentin Comte

Membres du Jury :

Prof. Martine Rebetez, directrice de thèse (Université de Neuchâtel et WSL)

Prof. Benjamin Bois (Université de Bourgogne)

Dr. Vivian Zufferey (Agroscope)

Prof. Annette Menzel (Technical University of Munich)


Soutenue le 8 février 2024


IMPRIMATUR

La Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Neuchâtel, sur les rapports de Mme Martine Rebetez, directrice de thèse, professeure, Université de Neuchâtel ; M. Benjamin Bois, maître de conférences, Université de Bourgogne, Dijon ; Mme Annette Menzel, professeure associée, Technical University of Munich ; M. Dr. Vivian Zufferey, AGROSCOPE, Pully autorise l'impression de la thèse présentée par M. Valentin Comte en laissant à l'auteur la responsabilité des opinions énoncées.

Neuchâtel, le 8 février 2024

Le doyen
Loris Petris

p.o. doyen



Menzel







Station météorologique de l'institut de géographie (UNINE) dans une parcelle de Pinot noir à Auvernier.

Photo : Valentin Comte

Remerciements

Durant 5 années j'ai eu le bonheur et la chance d'évoluer dans un cadre professionnel riche en qualités humaines au sein de l'institut de géographie de l'UNINE, comme au WSL.

Je me dois de remercier avant tout ma directrice de thèse, Martine Rebetez. C'est en effet elle qui a monté le projet dans lequel s'est inscrit cette thèse et qui m'a convaincu d'y prendre part. Durant tout mon cursus académique, elle m'a apporté un soutien exceptionnel, en tout temps. En plus de ses conseils avisés et de son aide indéfectible, je tiens à la remercier pour sa gentillesse et le rôle extra-académique qu'elle a endossé durant des phases personnelles éprouvantes, notamment à la suite du décès d'un proche.

Je remercie également les membres du jury, Benjamin Bois, Vivian Zufferey et Annette Menzel, d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Leurs remarques et suggestions de corrections ont permis d'améliorer la qualité de la thèse.

Durant ces 5 années j'ai pu bénéficier de la présence d'un voisin de bureau particulièrement avenant et sympathique en la personne de Léonard Schneider. Je le remercie donc pour ses aides et conseils pour le codage R, comme pour la rédaction, ainsi que pour ses précieux sarcasmes.

Mes remerciements se portent également auprès de la station viticole cantonale à Auvernier, plus particulièrement vers son directeur, Johannes Roesti, et auprès du responsable de la cave et du laboratoire, Yves Dothaux. Leurs accueils ont toujours été chaleureux lors de mes passages à Auvernier, et ils ont su m'apporter de l'aide, du soutien et des conseils lorsque ce fût nécessaire.

Il me tient à cœur de remercier Pierluigi Calanca : ses contributions dans la rédaction des deux premiers articles scientifiques présentés dans cette thèse furent plus que précieuses. Je le remercie pour ses critiques, toujours justes, ainsi que pour son esprit perfectionniste qui a permis de grandement améliorer la qualité des résultats scientifiques présentés dans ces articles.

Je voudrais également remercier Geoffrey Klein, Constant Signarbieux et Yann Vitasse pour leurs conseils et partages de connaissances avec le logiciel R.

Ce fût une chance de pouvoir évoluer dans un institut où règne la bonne ambiance et la bienveillance. Je voudrais donc remercier l'ensemble de mes collègues au sein de l'institut de géographie.

Je remercie également Baptiste Sneiders pour sa participation bénévole au troisième article proposé dans cette thèse. Ce fût fort sympathique de collaborer sur un travail scientifique avec un ami.

Durant mes périodes de travail à distance, j'ai travaillé dans les locaux de l'Atelier 20 à Delémont. Je remercie les membres de l'association qui m'ont bien accueilli pour leur sympathie, et plus spécialement Zoé Scrima pour ses enseignements sur Adobe Illustrator qui m'ont permis de gagner en efficacité pour la mise en valeur de résultats.

Je tiens également à remercier mes relecteurs pour les nombreuses coquilles qui ont pu être corrigées, ainsi que pour leurs critiques constructives.

Cette thèse n'aurait pas pu prendre forme sans le soutien financier de la Confédération (Office fédéral de l'environnement), de la République et Canton de Neuchâtel, des communes viticoles et de la profession vitivinicole du canton. Je les remercie pour la confiance qu'elles m'ont accordée.

Je remercie également mes amis et ma famille pour leur soutien indéfectible.

Enfin je remercie Estelle, celle qui m'a accompagné dans l'ombre et soutenu dans les moments difficiles. C'est un exercice relativement exigeant et usant psychologiquement que de réaliser une thèse de doctorat, et je sais que l'exercice aurait été bien plus compliqué si elle n'avait pas été à mes côtés tout ce temps.

Résumé

Cette thèse de doctorat en climatologie appliquée s'intéresse aux impacts des changements climatiques sur la viticulture neuchâteloise au travers des indices bioclimatiques. Les changements climatiques constituent un enjeu contemporain majeur qui touche l'ensemble du globe. L'agriculture, ainsi que la viticulture, sont impactées directement et indirectement par les changements climatiques. La hausse des températures de l'air et de la fréquence et durée des périodes de sécheresse modifie les stades phénologiques de la vigne, ainsi que la composition phénolique des vins produits. Les changements climatiques amènent des modifications dans l'aire de répartition et les cycles de reproduction des ravageurs et dans l'occurrence des maladies fongiques qui affectent la vigne.

Ce travail se focalise dans un premier temps sur les impacts directs amenés par les changements climatiques pour le vignoble neuchâtelois, soit sur l'évolution des indices bioclimatiques pertinents pour la viticulture de 1900 à aujourd'hui. Puis, avec pour but d'anticiper les moyens d'adaptation à venir, les tendances futures des indices bioclimatiques pertinents sont abordées selon deux scénarios d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre futurs : un scénario optimiste (RCP4.5) et un scénario pessimiste (RCP8.5).

Enfin, nous nous sommes focalisés sur une modélisation de changements futurs dans l'aire de répartition des insectes ravageurs viticoles, en nous focalisant particulièrement sur deux espèces : l'eudémis de la vigne et la cicadelle de la vigne (respectivement *Lobesia botrana* et *Scaphoideus titanus*). Nous avons utilisé les mêmes scénarios d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre (RCP4.5 et RCP8.5).

Nos résultats montrent que le climat viticole, illustré par des indices bioclimatiques, s'est passablement réchauffé (+400 HI et +2°C sur la période végétative ces 40 dernières années). Les tendances pour l'indice de Huglin, la température moyenne de la période végétative de la vigne, et les indices de fraîcheur des nuits indiquent que des mesures d'adaptation seront nécessaires pour maintenir une production de vins de qualité. Du point de vue de la température moyenne de la période végétative de la vigne, le climat viticole est passé en 50 ans d'un climat froid, à la limite des possibilités de culture des cépages à la phénologie la plus précoce, à un climat intermédiaire, trop chaud pour les cépages les plus précoces selon cet indice. Nos résultats avec l'indice de Huglin indiquent que le climat viticole est passé durant la

même période de la catégorie « trop froid », à la catégorie « tempérée », renforçant le constat précédent. Les tendances avec un indice de fraîcheur des nuits qui tient compte de l'avancée de la date des vendanges, montrent que le Pinot noir bénéficiera de moins en moins souvent de températures nocturnes fraîches avant les vendanges. Ces trois indices montrent également que le climat était trop frais pour la production de vins de qualité il y a 50 ans, et que la hausse des températures de l'air est également bénéfique de ce point de vue dans la région puisqu'elle permet la production de vins de qualité.

Les perspectives pour le futur montrent que quel que soit le scénario, le climat viticole du vignoble neuchâtelois va continuer à se réchauffer jusque dans les années 2050. Pour le milieu de siècle et donc les années 2035 à 2064, les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ne montrent pas de différence significative entre les tendances des indices bioclimatiques analysés. La température moyenne de la période végétative de la vigne devrait avoisiner 17.5°C (17.9°C au bord du lac et 17°C sur les hauteurs du vignoble), contre 15.5°C pour la période récente (1991-2020). Le climat viticole sera alors dans la catégorie « chaud », pour « warm », de cet indice bioclimatique. Une hausse substantielle de l'indice de Huglin relatif au vignoble neuchâtelois devrait également se produire. Nos résultats indiquent que pour le milieu du siècle (2035-2064), on devrait avoisiner en moyenne 2000 HI (2100 au bord du lac et 1900 sur les hauteurs du vignoble), contre 1650 pour la période récente (1991-2020) dans la région.

Pour la fin de siècle (2070-2099), le climat viticole se réchauffe très peu en comparaison avec le milieu de siècle avec RCP4.5. Nos résultats avec RCP8.5 indiquent en revanche que le climat de fin de siècle serait un nouveau type de climat. Il serait particulièrement problématique pour la culture de la vigne, puisque très chaud, et incluant 'une hausse des événements météorologiques extrêmes (sécheresses, pluies diluviennes, etc.). Ces résultats indiquent un besoin en moyens d'adaptation grandissant, sans pour autant condamner la culture des cépages traditionnellement cultivés dans la région. Ils indiquent néanmoins que les possibilités de culture de cépages plus thermophiles que le Pinot noir pourraient constituer une mesure d'adaptation à long terme, tout comme un déplacement plus haut en altitude des cépages les plus précoces.

Nos résultats relatifs aux ravageurs viticoles indiquent que le climat du vignoble neuchâtelois deviendra de plus en plus adapté de manière générale aux insectes invasifs exotiques. Les

résultats pour l'eudémis de la vigne indiquent que cette espèce devrait pouvoir produire plus de générations, 3 générations 1 année sur 4 d'ici le milieu du siècle selon les deux scénarios utilisés. Pour la fin de siècle, avec RCP8.5, c'est presque une année sur 2 qu'il faudrait compter sur 3 générations. Comme les pièges à confusion sexuelle semblent fonctionner relativement bien pour cette espèce, cela n'est toutefois pas très inquiétant pour le vignoble neuchâtelois. Nos résultats pour la cicadelle sont eux plus inquiétants. Cette espèce, porteuse de la flavescence dorée, n'est pas encore présente dans le vignoble. Le climat actuel est moyennement propice à l'adaptation de cette espèce. Nos résultats pour le futur indiquent que quel que soit le scénario (RCP4.5 et RCP8.5), le climat sera idéal pour cette espèce dans le vignoble neuchâtelois. La station viticole cantonale à Auvernier a déjà mis au point une stratégie de surveillance, avec la mise en place de dizaines de pièges dans le but d'éviter une arrivée surprise et incontrôlée de cette espèce dans la région. Nos résultats viennent confirmer que cette stratégie est nécessaire et judicieuse.

D'autres résultats, mais n'ayant pas fait l'objet de publications scientifiques, ont également été produits. Ceux-ci concernent notamment le risque de gel printanier et la fréquence de jours avec des seuils problématiques pour la culture de la vigne (30 et 35 °C).

Nos résultats sur le gel printanier indiquent que le risque de rencontrer ce phénomène devrait demeurer stable dans les prochaines décennies, quel que soit le scénario climatique. Ce risque devrait même diminuer si des cépages plus tardifs viennent supplanter une partie des cépages précoces actuellement cultivés à Neuchâtel.

Nos résultats relatifs aux seuils de température indiquent qu'il sera de plus en plus fréquent de rencontrer des températures au-dessus de 30°C et 35°C durant l'été. Alors que ces températures étaient rarement atteintes avant les années 1990, il sera normal d'avoir une vingtaine de jours où la température dépasse 30°C d'ici le milieu du siècle. Pour la fin de siècle cela dépend beaucoup des scénarios et des RCMs utilisés. La plupart des RCMs montrent un décrochage entre les données mesurées et celles simulées pour la période actuelle, ce qui semble confirmer que la hausse des températures estivales pour l'Europe centrale est sous-estimée dans la plupart des GCMs (Global Climate models) et RCMs (Regional Climate models).

Nos différents résultats démontrent à quel point le changement climatique peut affecter l'agriculture et qu'il est important d'en saisir la complexité afin de pouvoir anticiper les

problèmes futurs et s'adapter en amont pour pouvoir assurer la pérennité de la production agricole.

Mots-clefs : Changement climatique / viticulture / vigne/ vins/ indices bioclimatiques / impacts des changements climatiques / adaptation / température de l'air / modélisation / température de la période végétative / indice de Huglin / indice fraîcheur des nuits / insectes ravageurs

Summary

This doctoral thesis in applied climatology focuses on the impacts of climate change on viticulture in the Neuchâtel region through bioclimatic indices. Climate change is a major contemporary issue affecting the entire globe. Agriculture, including viticulture, is directly and indirectly impacted by climate change. The rise in air temperatures and the frequency and duration of drought periods alter the phenological stages of the vine, as well as the phenolic composition of the wines produced. Climate change brings about changes in the distribution areas and reproductive cycles of pests and in the occurrence of fungal diseases affecting the vine.

This work first focuses on the direct impacts brought about by climate change for the Neuchâtel vineyard, specifically on the evolution of relevant bioclimatic indices for viticulture from 1900 to the present day. Then, with the aim of anticipating future adaptation measures, the future trends of relevant bioclimatic indices are addressed according to two future anthropogenic greenhouse gas emission scenarios: an optimistic scenario (RCP4.5) and a pessimistic scenario (RCP8.5).

Finally, we focus on modeling future changes in the distribution area of vineyard pests, particularly focusing on two species: the European grapevine moth and the grape leafhopper (respectively *Lobesia botrana* and *Scaphoideus titanus*). We used the same scenarios of anthropogenic greenhouse gas emissions (RCP4.5 and RCP8.5).

Our results show that the viticultural climate, as illustrated by bioclimatic indices, has warmed considerably (+400 Growing Degree Days and +2°C over the past 40 years). Trends for the Huglin Index, the average temperature during the vine's vegetative period, and the coolness indices of the nights indicate that adaptation measures will be necessary to maintain a production of quality wines. From the perspective of the average temperature during the vine's vegetative period, the viticultural climate has shifted in 50 years from a cold climate, on the edge of the possibilities for cultivating the earliest ripening grape varieties, to an intermediate climate, too warm for the earliest ripening grape varieties according to this index. Our results with the Huglin Index indicate that during the same period, the viticultural climate shifted from the "too cold" category to the "temperate" category, reinforcing the previous observation. Trends with a coolness index of nights, which considers the

advancement of the harvest date, show that Pinot Noir will benefit less and less often from cool nighttime temperatures before harvest. These three indices also show that the climate was too cool for quality wine production 50 years ago, and that the rise in air temperatures is also beneficial from this perspective in the region as it allows to produce quality wines.

Future perspectives show that regardless of the scenario, the viticultural climate of the Neuchâtel vineyard will continue to warm until the 2050s. For the mid-century and thus the years 2035 to 2064, the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios show no significant difference in the trends of the analyzed bioclimatic indices. The average temperature during the vine's vegetative period is expected to be around 17.5°C (17.9°C by the lake and 17°C in the vineyard heights), compared to 15.5°C for the recent period (1991-2020). The viticultural climate will then be in the "warm" category according to this bioclimatic index. A substantial increase in the Huglin Index relative to the Neuchâtel vineyard is also expected. Our results indicate that for the mid-century (2035-2064), we should expect an average of around 2000 Growing Degree Days (2100 by the lake and 1900 in the vineyard heights), compared to 1650 for the recent period (1991-2020) in the region.

For the end of the century (2070-2099), the viticultural climate warms very little compared to the mid-century with RCP4.5. Our results with RCP8.5, however, indicate that the end-of-century climate would be a new type of climate. It would be particularly problematic for vine cultivation, being very hot and including an increase in extreme weather events (droughts, torrential rains, etc.). These results indicate a growing need for adaptation measures, without necessarily condemning the cultivation of traditionally grown grape varieties in the region. They do suggest, however, that the cultivation of more heat-tolerant grape varieties than Pinot Noir could be a long-term adaptation measure, as well as a shift to higher altitudes for the earliest ripening grape varieties.

Our results regarding vineyard pests indicate that the climate of the Neuchâtel vineyard will become increasingly suitable in general for invasive exotic insects. Results for the European grapevine moth indicate that this species is expected to produce more generations, 3 generations per year out of 4 by the mid-century according to the two scenarios used. For the end of the century, with RCP8.5, it's almost every other year that we would expect to have 3 generations. As sex pheromone traps seem to work relatively well for this species, this is not

very concerning for the Neuchâtel vineyard. Our results for the grape leafhopper are more worrying. This species, a carrier of grapevine yellows, is not yet present in the vineyard. The current climate is moderately conducive to the adaptation of this species. Our results for the future indicate that regardless of the scenario (RCP4.5 and RCP8.5), the climate will be ideal for this species in the Neuchâtel vineyard. The cantonal vineyard station in Auvèrnièr has already developed a surveillance strategy, with the installation of dozens of traps aimed at preventing a surprise and uncontrolled arrival of this species in the region. Our results confirm that this strategy is necessary and appropriate.

Other results, which have not been the subject of scientific publications, have also been produced. These include the risk of spring frosts and the frequency of days with problematic thresholds for vine cultivation (30 and 35°C). Our results on spring frosts indicate that the risk of encountering this phenomenon should remain stable in the coming decades, regardless of the climate scenario. This risk should even decrease if later-ripening grape varieties replace some of the early-ripening varieties currently grown in Neuchâtel. Our results concerning temperature thresholds indicate that it will be increasingly common to encounter temperatures above 30°C and 35°C during the summer. While these temperatures were rarely reached before the 1990s, it will be normal to have around twenty days where the temperature exceeds 30°C by the mid-century. For the end of the century, it depends a lot on the scenarios and RCMs used. Most RCMs show a discrepancy between measured and simulated data for the current period, which seems to confirm that the increase in summer temperatures for Central Europe is underestimated in most GCMs (Global Climate models) and RCMs (Regional Climate models).

Our various results demonstrate how much climate change can affect agriculture and how important it is to grasp its complexity to anticipate future problems and adapt in advance to ensure the sustainability of agricultural production.

Keywords: Climate change / viticulture / vine / wine / bioclimatic indices / climate change impacts / adaptation / air temperature / modelization / growing season temperature / Huglin index / cool night index / insect pests

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	7
Summary	11
Publications	17
Lexique	18
1. Introduction	18
1.2. La vigne	19
1.2.1. Phénologie de la vigne	20
1.2.2. Facteurs déterminants pour la vitiviniculture	21
1.3. Le vignoble neuchâtelois	24
1.4. La vigne dans un contexte de changements climatiques	25
1.4.1. Impacts indirects du changement climatique sur la viticulture : ravageurs et maladies fongiques	28
1.4.2. Les indices bioclimatiques	32
1.4.3. Adaptations à la vigne et en cave	35
1.4.4. La modélisation climatique et les scénarios climatiques futurs	39
1.5. Problématique	42
1.5.1. Questions de recherche	42
1.5.2. Buts de la thèse	43
1.6. Méthodologie générale	44
2. Effets du changement climatique sur les indices bioclimatiques relatifs au vignoble neuchâtelois	47
2.1. Introduction	48
2.2. Materials and Methods	52
2.2.1. Study area	52
2.2.2. Data	53
2.2.3. Methods	54
2.3. Results	55
2.3.1. Trends in average growing season temperature (GST) since 1900	55
2.3.2. Huglin's heliothermal index: trends, maps and variability	58
2.4. Discussion	67
2.5. Conclusions	69
3. Les conditions climatiques futures pourraient menacer les possibilités d'adaptation du vignoble neuchâtelois aux changements climatiques	77

3.1. Introduction.....	78
3.2. Materials and methods	81
3.2.1. Bioclimatic indices.....	81
3.2.2. Study area.....	82
3.2.3. Data	83
3.2.4. Methods	84
3.3. Results	85
3.3.1. Current climate of Neuchatel vineyards	85
3.3.2. Trends in GST and HI with RCP4.5 and RCP8.5 with all RCMs	87
3.3.3. Future bioclimatic conditions of Neuchatel with a focus on SMHI-RCA4-ECEARTH_EUR11	90
3.3.4. GST maps for mid-century and for the end of the century with RCP4.5 and RCP8.5	92
3.3.5. HI maps for mid-century and for the end of the century with RCP4.5 and RCP8.5	93
3.4. Discussion.....	97
3.5. Conclusions.....	99
4. Impacts potentiels d’insectes ravageurs dans le vignoble neuchâtelois sous l’effet des changements climatiques	109
4.1. Introduction.....	110
4.2. Materials and methods	112
4.2.1. Study area.....	112
4.2.2. Data	113
4.2.3. Methods	114
4.3. Results	115
4.3.1. GDDs (tb = 10°C) in Neuchatel vineyards.....	115
4.3.2. Climatic acclimatation of the European grapevine moth in Neuchatel vineyards.....	118
4.3.3. Climatic acclimatation of the American grapevine leafhopper in Neuchatel vineyards.....	119
4.4. Discussion	120
4.5. Conclusions.....	122
5. Discussion générale	129
5.1. Interprétation des résultats et perspectives de recherche	129
5.2. Solutions d’adaptation	135
5.3. Conclusions générales	138
Bibliographie.....	140

Liste des Figures	152
Liste des Tables	155
6. Annexes.....	156
6.1. Liste des stations météorologiques utilisées	156
6.2. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C .	157
6.3. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C .	174
6.4. Risque de gel printanier pour le Pinot noir à Neuchâtel	191
6.5. Carte de l'utilisation du sol autour de la commune de Milvignes, dans le littoral neuchâtelois	193

Publications

Conformément au règlement des thèses par article de l'Université de Neuchâtel (Art. 3, Procédure à suivre pour l'inscription et la soutenance de thèses par articles, Directive décanale, Faculté des Lettres et sciences humaines, Université de Neuchâtel, 2022), trois articles constituent des chapitres de cette thèse :

Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., and Rebetez, M. (2022) Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 147, Issue 1, Pages 423-436. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>.

Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., Zufferey, V. and Rebetez, M. (2023) Future climatic conditions may threaten adaptation capacities for vineyards along Lake Neuchâtel, Switzerland. *OENO One*, Vol. 57, Issue 2, Pages 85-100. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7194>.

Comte, V., Schneider, L., Sneiders, B. and Rebetez, M. (2024) Climate change is likely to favour polyvoltine and invasive insect species, leading to more damage in the mid-latitude vineyards of Neuchatel. *OENO One*. Article soumis le 20.09.2023.

Durant mon cursus de doctorant à l'université, j'ai également pu apporter une contribution à la réalisation de deux autres publications scientifiques listées ci-dessous :

Schneider, L., Comte, V. and Rebetez, M., (2021) Increasingly favourable winter temperature conditions for major crop and forest insect pest species in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 298-299:108315. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108315>.

Schneider, L., Comte, V. and Rebetez, M. (2023) Temperatures during the development season are increasingly favourable for polyvoltine pest species in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 338 :109503. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109503>.

Lexique

CMIP6 : Projet d'intercomparaison de modèles couplés, 6^{ème} phase

GCMs: Global Climate models

GDDs: Growing degree days

GIEC=IPCC (en anglais) : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

GMCCS : Géoviticulture Multicriteria Climatic Classification System

GST : Growing season temperature, soit la température moyenne de la période végétative de la vigne

Hyl : Indice hydrothermique

IH=HI (en anglais) : Indice héliothermique de Huglin

IF=CI (en anglais) : Indice de fraîcheur des nuits, soit la moyenne des minima de septembre

IFAV=PHCI (en anglais) : Indice de fraîcheur des nuits d'avant vendange, il correspond à la moyenne des minima de la température de l'air des 30 nuits qui précèdent les vendanges

NEU : Station météorologique de Neuchâtel appartenant à MétéoSuisse (485m)

pH: potentiel hydrogène, mesure de l'acidité ou basicité d'une solution

RCMs : Regional Climate models

RCP : Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre anthropique (Representative Concentration Pathways), dérivés en scénarios climatiques

Tmax : Température journalière maximal de l'air

Tmin : Température journalière minimal de l'air

Tmoy : Température journalière moyenne de l'air

1. Introduction

1.1. Le changement climatique

Depuis 1750, la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre augmente, et constitue actuellement l'un des principaux enjeux de sociétés mondiaux. Ce phénomène est dû à l'activité humaine, en particulier par la consommation d'énergies fossiles (IPCC, 2021). Les principaux gaz à effet de serre issus de l'activité humaine sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les gaz fluorés (CFC, HFC, HCFC, PFC, etc.) (Butler & Montzka, 2016). Les principaux effets engendrés par cette modification de la composition atmosphérique sont une hausse globale des températures de l'air et des eaux de notre planète, une acidification et une hausse du niveau des océans, une modification des régimes de précipitations, une désertification de terres arables, la fonte de calottes glaciaires

et du permafrost et une augmentation des phénomènes météorologiques extrêmes (IPCC, 2021). L'évolution n'est toutefois pas uniforme à l'échelle mondiale. L'Europe continentale se réchauffe plus vite que la moyenne mondiale, et les pluies se raréfient dans le bassin méditerranéen, alors qu'elle tendent plutôt à augmenter au nord de l'Europe (IPCC, 2021). Les changements climatiques ont un impact certain et direct sur la biosphère, mais les effets varient dans les différentes régions du globe.

Pour l'agriculture en Europe, les paramètres qui ont le plus d'impacts auxquels on assiste principalement sont une hausse des températures de l'air, une modification du régime des pluies et une hausse de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses, les canicules et les phénomènes de précipitations intenses (IPCC, 2021). Au niveau européen, on observe également des différences régionales, notamment entre les zones côtières et continentales. Ces modifications climatiques ont des impacts importants sur le secteur agricole, notamment une hausse des maladies et ravageurs agricole et des modifications de la répartition terrestre des niches climatiques relatives aux espèces cultivées et élevées (Parmesan et al., 2022). La hausse des températures de l'air occasionne une avancée des stades phénologiques des plantes, y compris celles qui sont cultivées (Menzel & Fabian, 1999; Menzel et al., 2006). Les changements climatiques déjà opérés et ceux qui viendront dans les prochaines décennies nécessiteront des mesures d'adaptation pour la pérennité de la production agricole (IPCC, 2021; Parmesan et al., 2022).

1.2. La vigne

La vigne (*Vitis Vinifera*) se cultive un peu partout à travers le monde, principalement entre les latitudes 30° et 50° des deux hémisphères, plus précisément entre les isothermes 12°C et 22°C de température moyenne de l'air durant la période végétative pour le raisin de cuve, suite à un long processus de sélection d'espèces, de création et de disparition de cépages, ainsi qu'à l'exportation des cépages vers le Nouveau Monde depuis le 15^{ème} siècle (Jones, 2006; Schultz & Jones, 2010; Unwin, 2005). De nos jours, on estime qu'il existe des milliers des cépages, entre 5000 et 10'000 si on comprend l'ensemble des types de culture, c'est-à-dire le raisin de table, le raisin de cuve et le raisin sec (Lacombe, 2012). La répartition actuelle des cépages dans les vignobles du monde est le fruit d'une sélection de la part des milieux vitivinicoles en fonction de l'adaptabilité de ceux-ci aux différents terroirs (de Cortazar Aauri et al., 2016;

Jones, 2006; van Leeuwen & Darriet, 2016).

1.2.1. Phénologie de la vigne

La période végétative de la vigne se déroule de fin mars/début avril à septembre/octobre dans l'hémisphère Nord, et il en va de même en Suisse. Par phénologie, on entend : « (...) *l'étude de l'apparition d'événements annuels périodiques dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat. Chez les végétaux, les différentes étapes constituant ces événements sont entre autres le développement foliaire, la floraison et la fructification, ou encore la maturation des fruits.* » (Bloesch & Viret, 2008).

Plusieurs modes de qualifications et de classements des stades phénologiques de la vigne existent. Historiquement, il y a d'abord eu celui de Baggioini (1952), comprenant 16 stades. Puis est apparu celui de Eichhorn et Lorenz (1977), qui en comprend 22. Suite à l'apparition de l'échelle BBCH, une échelle internationale utilisable pour l'ensemble des espèces végétales, Baillod et Baggioini (1993) ont proposé un nouveau mode de qualifications et de classements des stades phénologiques de la vigne. Celui-ci correspond à l'échelle BBCH, mais tient également compte des différences entre les cépages. Plus récemment, Bloesch et Viret (2008) ont actualisé cette échelle, considérant 7 stades principaux, qui regroupent plusieurs étapes phénologiques, se divisant elles-mêmes en stades secondaires (Figure 1.1).

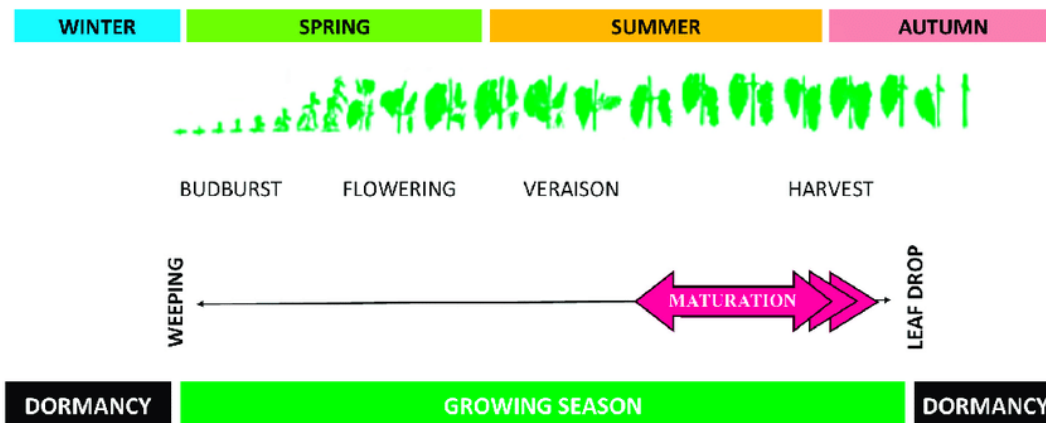
Stade 0:	débourrement
Stade 1:	développement des feuilles
Stade 5:	apparition des inflorescences
Stade 6:	floraison
Stade 7:	développement des fruits
Stade 8:	maturation des baies
Stade 9:	sénescence et début de la période de dormance.

Figure 1.1. Stades phénologiques principaux de la vigne.

Source : Bloesch and Viret (2008).

Dans la plupart des études qui traitent des impacts du changement climatique sur la vigne et sur sa phénologie, l'analyse se focalise sur un nombre réduit de stades que l'on qualifie usuellement de principaux (Camps & Ramos, 2012; Jones & Davis, 2000; Lebon, 2002; Madelin et al., 2010; Neethling et al., 2011; Ramos Martín et al., 2018, entre autres; Seguin, 2007). La Figure 1.2 présente les stades phénologiques que l'on retrouve dans la plupart des travaux

réalisés sur les impacts des changements climatiques sur la vigne. Ainsi, le débourrement, soit



la période de sortie des bourgeons, la floraison, la véraison, qui correspond à la phase de coloration des baies, et les vendanges constituent les principaux stades phénologiques de la vigne.

Figure 1.2. Cycle biologique de la vigne.

Source: Santos et al. (2020).

1.2.2. Facteurs déterminants pour la vitiviniculture

Nous avons subdivisé les facteurs déterminants pour la viticulture en quatre catégories distinctes, car cela correspond à ce qu'on peut trouver dans des ouvrages majeurs scientifiques sur la vigne et la viticulture, notamment (Huglin & Schneider, 1998). Toutefois la frontière entre ces éléments n'est pas toujours évidente. Ces quatre catégories sont en interactions et le choix des éléments retenus dans chacune des catégories demeure arbitraire. Le concept de terroir, qui englobe le tout, est également explicité plus bas.

Le climat

Le climat est fort probablement le critère le plus déterminant pour la culture de la vigne et la production de vins de qualité (Jones & Davis, 2000; Santos et al., 2011; van Leeuwen et al., 2004). Historiquement, on cultive la vigne principalement entre les latitudes 30°-50° nord et sud, en raison de la température de l'air, qui est le facteur climatique limitant pour la croissance et la productivité des raisins (Jones, 2012; Seguin & Garcia de Cortazar, 2005). Ainsi, pour les deux hémisphères, les climats les plus propices à la viticulture sont ceux caractérisés par des températures de l'air moyennes pendant la période végétative (1^{er} avril au 31 octobre

pour l'hémisphère nord) allant de 12 à 22 °C (Jones, 2012). La température moyenne de l'air explique par ailleurs la répartition géographique des différents cépages à travers le monde (Huglin & Schneider, 1998). Durant la période de maturation des baies, la température joue un rôle sur les arômes et la couleur des vins (Jackson & Lombard, 1993). Le rôle de la température nocturne durant cette même période impacte particulièrement la couleur qu'aura le vin (Fregoni & Pezzutto, 2000; Kliewer, 1973b; Kliewer & Torres, 1972; Tonietto & Carbonneau, 2004). Des nuits suffisamment fraîches le mois qui précède les vendanges sont importantes car elles permettent la production de métabolites secondaires (polyphénols, arômes) par la plante (Kliewer, 1973b; Kliewer & Torres, 1972). Elles ont donc probablement un impact sur la qualité des vins produits (Tonietto & Carbonneau, 2004).

Une température diurne élevée, supérieure à 35 °C, impacte la plante qui active alors ses mécanismes de réaction à la chaleur (Bernardo et al., 2018; Ferrandino & Lovisolo, 2014). Au-dessus de ce seuil, la physiologie et la biochimie de la vigne sont inhibées, voire bloquées (Deloire et al., 2021; Laget et al., 2008; Venios et al., 2020). Une température de l'air supérieure à 30 degrés affecte déjà certains paramètres de la vigne. Au-delà de ce seuil, on peut déjà observer des flétrissements des baies, un trouble de l'accumulation de sucre, une diminution de l'acidité titrable, une hausse du pH et une moindre teneur en anthocyanes (Deloire et al., 2021; Laget et al., 2008; Venios et al., 2020).

Pour ce qui est de la vitiviniculture, on considère le climat sur trois échelles (macro-climat, méso-climat et micro-climat), les frontières entre ces différentes échelles demeurant fortement discutables (Huglin & Schneider, 1998).

L'apport en rayonnement solaire varie en fonction de la latitude à laquelle se situe le vignoble, mais également de sa pente et de son orientation (versant sud, sud-est, nord, etc.) (Zufferey et al., 2022). Il apparaît que plus l'on se situe à des latitudes élevées, plus, historiquement, on aura tendance à trouver des vignobles en pente, afin de bénéficier d'un apport accru en rayons solaires, dans une optique d'accumulation de chaleur (Huglin & Schneider, 1998). Dans les climats viticoles chauds, on va plutôt jouer sur l'altitude afin de bénéficier de températures plus fraîches (Huglin & Schneider, 1998). Il est donc possible de jouer avec les critères d'exposition et d'altitude afin de bénéficier de plus ou moins d'apport en chaleur. On relève également la particularité des régions viticoles en bordure de lac. Le lac joue alors un rôle de réserve de chaleur (accumulation de chaleur la journée, restitution la nuit). Les régions

viticoles en bordure de lac bénéficient aussi d'un apport en ensoleillement plus important au printemps, les rayons étant en partie reflétés par le lac sur les coteaux (Heim, 1996). Mais d'une autre part l'ensoleillement demeure limité par la présence de brouillard certains jours. Les lacs sont aussi importants pour réduire le risque de gel printanier, puisqu'ils ont un effet tampon sur les températures de l'air (Vitasse & Rebetez, 2018).

Le sol

Le sol constitue un facteur essentiel à la culture de la vigne. Il se caractérise par sa structure physique, sa composition chimique, sa température, ses réserves en eau ainsi que ses interactions avec les différentes sources d'approvisionnement en eau (Huglin & Schneider, 1998; van Leeuwen & Vivin, 2008). Il est possible de modifier un sol de façon marginale, en changeant ses composants et donc en le rendant plus ou moins adapté à la culture de la vigne. Si historiquement la vigne était caractérisée par un sol plutôt en pente, sec et peu fertile, ce n'est plus le cas de nos jours (Huglin & Schneider, 1998). On trouve aujourd'hui toute une série de cépages bien distincts, adaptés aux différents types de sol et aux climats locaux (Jones et al., 2005). Dans le vignoble neuchâtelois, on aura plutôt tendance à retrouver du Chasselas sur des sols humides et argileux, alors qu'on préférera un sol sec et sableux pour le Pinot noir.

L'apport hydrique et la réserve disponible en eau

La réserve disponible en eau dépend du couvert et de la texture du sol, notamment de la proportion en pierre, de la profondeur des racines, de la pluie, de la surface foliaire et de l'évapotranspiration (van Leeuwen & Darriet, 2016). L'évapotranspiration est quant à elle en lien direct avec les températures, puisque plus il fera chaud plus elle sera importante. Un déficit en eau a pour conséquence d'impacter négativement la photosynthèse et la croissance des pousses (Hsiao, 1973; Lebon et al., 2006), ainsi que de réduire la taille des baies (van Leeuwen & Seguin, 1994). Si le déficit hydrique est important, il peut endommager les feuilles et bloquer la maturation des raisins (van Leeuwen & Vivin, 2008). En revanche, tant qu'il reste modéré, le déficit hydrique aura un impact positif sur la teneur en tannins et anthocyanes de la grappe (van Leeuwen & Darriet, 2016). Une contrainte hydrique modérée présente par ailleurs un plus grand taux de corrélation positif avec la qualité du vin produit, que lorsqu'on réalise une régression entre la température moyenne et la qualité, du moment que le déficit demeure modéré (van Leeuwen & Vivin, 2008). En outre la quantité produite en situation de

déficit hydrique modéré sera plus faible que lorsqu'il n'y a pas de déficit, et on observe une corrélation négative entre la qualité des vendanges et le rendement (Huglin & Schneider, 1998).

Les pratiques culturelles et le soin apporté à la vigne

Bien que le sol, pour autant qu'il soit approprié au cépage cultivé, et le climat jouent un rôle majeur, il ne faudrait pas négliger le fait que les vitiviniculteurs et vitivinicultrices possèdent une gamme de moyens d'action pour influencer le milieu naturel et la qualité des raisins qu'ils produisent. On peut également plus ou moins prémunir la vigne contre les maladies ou aléas climatiques (Huglin & Schneider, 1998; Mills-Novoa et al., 2016; Thiéry, 2008; Unwin, 2005). Le milieu naturel demeure ainsi en partie adaptable à la culture vitivinicole via divers procédés culturels (Huglin & Schneider, 1998). Les moyens d'actions disponibles pour la branche vitivinicole sont explicités dans le chapitre « Adaptations à la vigne et en cave ».

Le terroir

Le concept de terroir reprend les différents facteurs précités, mais également l'interaction entre ces différents facteurs, rendant l'analyse scientifique de ce concept relativement complexe (van Leeuwen & Seguin, 2006). Bonfante and Brillante (2022) proposent un état des lieux de la recherche autour de ce concept. Des travaux autour de ce concept ont été réalisés en Suisse, dans les cantons de Vaud, Valais et du Tessin, montrant notamment la grande diversité de terroirs qu'on peut identifier dans chaque région (Letessier & Fermond, 2023; Zufferey et al., 2008). Quénot (2014) propose une méthodologie d'étude des changements climatiques en tenant compte de ce concept pour aider la profession viticole à s'adapter.

1.3. Le vignoble neuchâtelois

Le vignoble neuchâtelois s'étend le long de la chaîne du Jura, jusqu'à ses frontières avec le canton de Vaud et le canton de Berne, soit de Vaumarcus au Landeron, principalement le long du lac de Neuchâtel (Figure 2.1 et Figure 3.1). Il compte 600 hectares de vigne. Il a la particularité d'avoir plus d'un quart de ses surfaces en vignes labélisées en agriculture biologique. Historiquement, on y cultivait surtout du Chasselas, depuis le 16^{ème} siècle et cela jusque dans les années 1970. Ensuite le Pinot noir a progressivement pris plus d'importance

et est même devenu le cépage majoritaire au début de ce siècle. De nos jours le vignoble est majoritairement constitué de cépages noirs (57% environ), principalement de Pinot noir (51% du vignoble en 2018) selon la station viticole cantonale à Auvernier. Le Chasselas demeure tout de même le deuxième cépage le plus cultivé (27% en 2018).

1.4. La vigne dans un contexte de changements climatiques

Vitis vinifera est particulièrement impactée par les changements climatiques car les différents cépages sont adaptés à des mésoclimats qui correspondent aux besoins de chacun, suite à un processus séculaire de sélections variétales de la part des viticulteurs et viticultrices (Jones & Webb, 2010). Des changements dans les conditions climatiques viennent donc bousculer un équilibre constitué à long terme.

Les changements climatiques impactent désormais l'ensemble des vignobles du monde en modifiant les conditions environnementales durant la période végétative de la vigne (Fraga et al., 2012; Morales-Castilla et al., 2020). Les principaux effets observés sont un avancement des différents stades phénologiques (Cook & Wolkovich, 2016; Cuccia et al., 2010; Jones & Davis, 2000; Jones & Webb, 2010; Lebon, 2002; Madelin et al., 2010; Moriondo et al., 2013; Rochard, 2016; Seguin, 2007; Tomasi et al., 2011; van Leeuwen & Darriet, 2016) et une modification de la typicité des vins produits (Battaglini et al., 2009; Boyer, 2016; Duchêne et al., 2010; Jones & Webb, 2010; Madelin et al., 2010; Schultz, 2000; van Leeuwen & Darriet, 2016). La hausse des températures de l'air durant la période végétative s'accompagne donc indubitablement de conséquences sur l'arôme des vins (Battaglini et al., 2009; De Orduna, 2010; Dequin et al., 2017; Duchêne & Schneider, 2005; Fuentes Espinoza et al., 2016). Elles se traduisent notamment par une augmentation des taux de sucre et donc du taux d'éthanol potentiel (si aucune intervention spécifique n'est entreprise pour désalcooliser les vins), ainsi que d'une augmentation du pH, et donc d'une diminution de l'acidité (De Orduna, 2010; Duchêne & Schneider, 2005; van Leeuwen & Darriet, 2016). Une faible acidité peut avoir pour conséquence une augmentation du risque de prolifération de certains éléments défavorables à la qualité aromatique des vins, comme par exemple une prolifération facilitée de *Brettanomyces bruxellensis* (De Orduna, 2010).

D'autres éléments aromatiques et phénoliques sont également bouleversés par de plus

hautes températures, comme les flavonoïdes, même si la formation de ces derniers est également liée à la radiation solaire (De Orduna, 2010).

En plus d'une hausse des températures de l'air qui permet un plus important assèchement des sols, on assiste à une modification du régime des pluies (IPCC, 2021). Cela implique des changements au niveau du stress hydrique de la vigne. Ainsi, l'augmentation du stress hydrique d'une contrainte légère vers un régime modéré qui est induite par les changements climatiques dans les régions du nord a tendance à augmenter la qualité des vins produits et à réduire les dégâts occasionnés par les maladies bénéficiant de l'humidité (Santillán et al., 2020). Cependant, dans le contexte actuel, soit une hausse de la durée et de l'intensité des périodes de sécheresse et une hausse des températures estivales journalières minimales, moyennes et maximales, l'augmentation du stress hydrique subi par la vigne vers une contrainte hydrique forte engendre une progressive nécessité de la mise en place de conduite d'irrigation dans les vignobles pour limiter les effets négatifs sur la récolte (Santillán et al., 2020). Si en Europe il n'est pas courant d'en trouver, on retrouve ce type d'installation majoritairement dans les vignobles du « Nouveau-Monde » (Chili, Californie, etc.) (Zufferey et al., 2022).

Les effets des changements climatiques sur la viticulture ne sont donc pas exclusivement négatifs et la balance entre effets positifs et négatifs varie en fonction des régions. En Suisse, les changements climatiques des dernières décennies sont plutôt bénéfiques pour la viticulture (Zufferey et al., 2022). Ils ont par exemple permis d'améliorer la qualité des vins produits, ainsi que de proposer une gamme de cépages cultivables plus large, car la plupart des vignobles helvétiques étaient situés historiquement dans des climats frais, voire parfois même trop frais, si on se base sur les indices bioclimatiques de Winkler (Amerine & Winkler, 1944) ou d'Huglin (Huglin, 1978).

Les changements climatiques attendus pour le futur à l'échelle mondiale rendent la situation plus critique pour les vignobles aux latitudes les plus basses (Moriondo et al., 2013). Ainsi, on s'attend à une progressive et partielle disparition des vignobles les plus au sud de l'Europe car le climat deviendra trop chaud et trop sec, si aucune nouvelle solution d'adaptation n'est trouvée (Moriondo et al., 2013; Tóth & Végvári, 2016). Pour les vignobles non méridionaux et

historiquement froids, comme ceux de la Suisse, on s'attend plutôt à des changements dans la pratique culturale et en cave à court terme et à un changement de l'encépagement et/ou à un déplacement plus en altitude des cépages traditionnels sur le long terme (G. V. Jones, 2007). Globalement il est donc attendu, à plus ou moins long terme, en fonction des particularités propres à chaque vignoble, à ce que les solutions préconisées soient un déplacement altitudinal des cépages traditionnels et/ou une modification de l'encépagement au profit de cépages plus thermophiles. La question de l'adaptation devient alors majeure. Et comme les vignobles à l'échelle locale diffèrent entre eux, les moyens d'adaptation à préconiser peuvent varier. Il faudra également compter sur les capacités d'adaptation à des échelles très fines, voire parcellaire (Quénol et al., 2019). En effet, on observe d'importantes disparités entre les vignes les plus exposées (basse altitude, versant d'adret, en pente, au bord d'un lac) et les zones qui étaient jadis moins propices à la viticulture (versants moins exposés, dans des zones en cuvette, etc.).

Il peut également être possible de s'adapter à court ou moyen terme sans passer par des changements adaptatifs drastiques. On peut par exemple remplacer le matériel végétal (porte-greffes, clones) de certains cépages cultivés, si des clones ou porte-greffes plus thermophiles existent. Il est aussi possible d'atténuer les impacts des changements climatiques sans modifier le matériel végétal utilisé. On peut modifier le régime hydrique, par le biais de l'irrigation, en changeant la pratique culturale et le soin apporté à la vigne, et/ou en ayant recours à des techniques de vinification (ex : pour diminuer la teneur en alcool) (Dequin et al., 2017; Zufferey et al., 2022).

Les possibilités d'adaptation futures dépendront fortement des efforts qui seront fournis ou non pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale.

Comme évoqué dans l'introduction générale de cette thèse, en plus d'une augmentation des températures de l'air, on s'attend également à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes, notamment pour les orages de pluie et de grêle, ainsi que pour les sécheresses (AghaKouchak et al., 2020; IPCC, 2021; Raupach et al., 2021; Rummukainen, 2012; Stott et al., 2016). Ces événements météorologiques peuvent amener des pertes de récoltes considérables certaines années (Poni et al., 2022; Spellman, 1999).

Des températures extrêmes, soit qui dépassent 35°C, sont particulièrement problématiques pour la culture de la vigne, sans distinction des cépages, d'autant plus si elles se suivent lors d'une canicule, causant des dégâts aux vignes, notamment aux raisins (Hulands et al., 2014; Kliewer, 1977; Spayd et al., 2002; Webb et al., 2009).

Les vignobles suisses sont fréquemment confrontés au gel printanier, c'est d'ailleurs l'un des accidents météorologiques le plus craint en Suisse avec la grêle (Zufferey et al., 2022). Pour lutter contre le gel, les viticulteurs effectuent des tailles tardives, afin de repousser le début du débourrement. Dans un contexte de changements climatiques, il est probable que ce risque soit impacté (Meier et al., 2018). La hausse des températures de l'air au printemps implique que les bourgeons des arbres fruitiers éclosent toujours plus précocement dans l'année (Lamichhane, 2021; Sgubin et al., 2018; Zohner et al., 2020). Si cette dynamique est plus rapide que l'occurrence et l'intensité du dernier jour de gel au printemps, alors le risque de gel printanier augmente pour les arbres (Vitasse et al., 2018). Les résultats obtenus en Suisse à propos d'autres cultures (pommiers et cerisiers) que la vigne indiquent que le risque de gel semble augmenter au-dessus de 800m pour les cultures concernées dans ces études, mais cela ne semble pas être le cas plus bas en altitude et donc en plaine (Vitasse & Rebetez, 2018; Vitasse et al., 2018). Or c'est en-dessous de 600m d'altitude que se situent la majorité des vignobles helvétiques. Il n'est actuellement pas clairement établi si le risque de gel printanier va augmenter pour la vigne ou non.

1.4.1. Impacts indirects du changement climatique sur la viticulture : ravageurs et maladies fongiques

En plus de la modification de la typicité des vins et de l'avancement de la phénologie de la vigne, d'autres questions se soulèvent avec le changement climatique, notamment des changements vis-à-vis des ravageurs et maladies auxquels les vigneron sont et seront confrontés. Ainsi on s'attend à des changements dans l'aire de répartition et au niveau de l'intensité des dégâts occasionnés par les maladies et ravageurs de la vigne (Boudon-Padieu & Maixner, 2007; Daane et al., 2018).

D'après Linder et al. (2016), les principaux ravageurs de la vigne actifs ou l'ayant été en Suisse sont le phylloxéra (*Daktulosphaira vitifoliae*), la tordeuse eudémis (*Lobesia botrana*), la cochyliis (*Eupoecilia ambiguella*), la pyrale de la vigne (*Sparganothis pilleriana*), les noctuelles

de la vigne (moins d'une dizaine d'espèces actives en Suisse sur la vigne), la boarmie (*Ectropis crepuscularia*) et la drosophile du cerisier (*Drosophila suzukii*). Ils évoquent aussi l'existence de ravageurs plus occasionnels ou dont les dégâts sont généralement mineurs, tels que les thrips de la vigne (*Drepanothrips reuteri*), la punaise verte (*Lygus spinolai*), l'acarien rouge (*Panonychus ulmi*), l'acarien jaune commun (*Eotetranychus carpini*), et des acariens ériophyides (*Calepitrimerus vitis* et *Colomerus vitis*). Ces ravageurs impactent directement la vigne. D'autres sont des vecteurs, soit des organismes transmetteurs de maladies. Linder et al. (2016) évoquent en Suisse la présence de diverses espèces de cochenilles, de la cicadelle verte (*Empoasca vitis*) ou encore du fulgore du stolbur (*Hyaletthes obsoletus*) comme vecteurs occasionnels de maladies.

Comme les insectes sont des organismes ectothermiques, ils dépendent de la température de l'air ambiant (Bale et al., 2002). Il est donc attendu que les espèces d'insectes thermophiles vont bénéficier de la hausse globale des températures de l'air (Schneider et al., 2023; Schneider et al., 2022). La hausse des températures hivernales devraient également permettre l'implantation de nouvelles espèces d'insectes en Suisse, en provenance de régions méridionales (Schneider et al., 2021; Vittoz et al., 2013). Les espèces ravageuses devraient étendre leur aire de répartition plus au nord et plus en altitude (Yan et al., 2017), celles de la vigne également (Boudon-Padieu & Maixner, 2007; Daane et al., 2018).

Les espèces plurivoltines, comme l'eudémis de la vigne par exemple, devraient être en mesure de produire plus de générations durant la période végétative de la vigne dans les décennies à venir, étant donné que les températures de l'air augmenteront (Altermatt, 2010; Castex et al., 2023).

L'introduction de nouvelles espèces par les mouvements de personnes et/ou de marchandises, souvent en provenance de climats plus chauds, implique en parallèle une probable hausse des risques que de nouvelles espèces vectorielles de maladies puissent s'installer et s'implanter dans nos latitudes, en bénéficiant du réchauffement de nos climats. La cochenille farineuse, originaire de l'Extrême-Orient, provoque d'ailleurs déjà des dégâts dans les vergers valaisans d'après le site Internet de son service de l'agriculture¹. La cicadelle de la vigne (*Scaphoideus titanus*) est également présente dans les vignobles du Tessin, du Valais, de Genève et de Vaud (Sneiders et al., 2019). Cet insecte que l'on retrouve

¹ <https://www.vs.ch/web/sca/cochenille-farineuse>

normalement dans les vignobles méditerranéens et qui a pu bénéficier de l'adoucissement progressif des températures à nos latitudes pour s'y installer, est activement surveillé et combattu par Agroscope et les milieux viticoles de manière globale, car c'est le vecteur de la flavescence dorée, maladie particulièrement dévastatrice si elle se répand. Le Canton de Neuchâtel a installé une dizaine de pièges afin de surveiller l'arrivée de cet insecte dans la région, dans le but de pouvoir réagir rapidement et prendre les décisions adéquates pour empêcher son expansion. Cette espèce a besoin de températures relativement douces en hiver pour offrir un taux de survie des œufs pondus durant l'été suffisant pour permettre la survie de l'espèce dans une niche écologique donnée (Chuche, 2010; Chuche & Thiéry, 2014). Les températures diurnes de l'air durant l'été constituent un autre facteur climatique déterminant pour cet insecte. Pour la ponte estivale, une température de l'air la journée proche de 21.6°C est optimale, des températures de l'air inférieures à 15°C ne sont pas idéales, des températures diurnes supérieures à 30°C empêche carrément la ponte (Rigamonti et al., 2017). Avec la hausse des températures de l'air en Europe, il est donc attendu que l'aire de répartition de cet insecte change, augmentant notamment les risques au nord des Alpes (Rigamonti et al., 2018).

En Suisse, on rencontre deux ravageurs que l'on regroupe sous le nom de « vers de la grappe », cochylys (*Eupoecilia ambiguella*) et eudémis (*Lobesia botrana*) (Linder et al., 2016). Cochylys préfère les climats frais et humide, et est sur le déclin en Suisse. Eudémis apprécie davantage les climats chauds, et est bien présent le long du bassin méditerranéen (Gutierrez et al., 2018). L'évolution climatique actuelle à Neuchâtel devrait donc hypothétiquement lui être favorable. L'eudémis de la vigne est l'un des insectes ravageurs majeurs de la vigne en Europe (Ioriatti et al., 2011). Cet insecte engendre des pertes de récolte à l'état larvaire en se nourrissant des baies et en aidant à la formation de la pourriture grise (*Botrytis cinerea*) (Ioriatti et al., 2011). Actuellement on a généralement deux générations d'eudémis par an à Neuchâtel, alors qu'on peut compter jusqu'à cinq générations par an dans des climats plus chauds, comme c'est le cas en Espagne (Gutierrez et al., 2018).

Depuis 2011 les vignobles suisses font également face à la drosophile du cerisier (Agroscope²). Un panel de mesures d'adaptation permet déjà d'y faire face efficacement pour la vigne (Kehrli & Linder, 2019). La drosophile du cerisier pourrait être de plus en plus présente en

² <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/production-vegetale/protection-vegetaux/drosophila-suzukii/weitere-infos-drosophila.html>

Europe centrale dans les prochaines décennies. Ceci, car dans un contexte de hausse des températures hivernales et printanières, les conditions climatiques devraient être plus favorables à cette espèce. Des hivers et printemps froids avec un nombre important de jours où la température de l'air descend au-delà de certains seuils (-5°C, 0°C et 10°C) ont un impact négatif sur le nombre d'insectes capturés les étés et automnes suivants (Leach et al., 2019; Thistlewood et al., 2018). La modélisation mise en avant par Leach et al. (2019) suggère également qu'il est possible de prédire quand et en quelle quantité la drosophile *suzukii* sera présente dans le vignoble en utilisant les températures hivernales et printanières. Le modèle qu'ils ont utilisé peut ainsi permettre de se préparer au mieux à l'instant où l'insecte fera son apparition dans le vignoble. Mazzetto et al. (2020) et Tonina et al. (2020) ont démontré la préférence de *suzukii* pour certains cépages. Le Sauvignon blanc, le Pinot gris, le Pinot blanc et le Chardonnay sont ainsi assez appréciés par cet insecte, alors qu'il est moins friand de Merlot, Garganega ou de Barbera (Tonina et al., 2020). Ceci suggère que l'intention portée pour combattre cet insecte ravageur dépend également des cépages cultivés. Le CABI à Delémont teste actuellement en Suisse (Canton du Jura et du Tessin) l'introduction de la guêpe *Ganaspis brasiliensis* comme moyen de lutte biologique contre ce ravageur.

En plus des insectes, la vigne est parfois victime de maladies cryptogamiques. Les principales maladies fongiques rencontrées en Suisse sont le mildiou, l'oïdium, la pourriture grise, le rougeot et le black rot (Viret & Gindro, 2014). On y rencontre également des maladies du bois et de pourritures des racines, où des champignons jouent un rôle important (Viret & Gindro, 2014).

Face à ces ravageurs et maladies, il existe plusieurs manières de lutter. La lutte prophylactique consiste ainsi à prendre des mesures avant même que les symptômes n'apparaissent (Linder et al., 2016; Viret & Gindro, 2014). Cela démarre avec le choix du matériel végétal (clone et porte-greffe utilisés) puis continue avec l'orientation des rangs, le type de système de conduite choisi, la taille aux moments opportuns, la densité de plantation, etc. (Viret & Gindro, 2014). Depuis les années 50 la recherche agronomique a permis un essor de la lutte intégrée, qui consiste à identifier les problèmes et les moments où appliquer les traitements pour y faire face (Linder et al., 2016; Viret & Gindro, 2014). Actuellement on assiste à un essor de la viticulture biologique ou en biodynamie dans le vignoble neuchâtelois. Ces deux types de viticulture se traduisent généralement à nos latitudes par un remplacement des produits

phytosanitaires classiques (fongicides, pesticides et insecticides) par des produits innovants, plus respectueux de l'environnement et peu ou pas toxiques, comme des antagonistes, des éliciteurs ou d'autres produits à base d'extraits végétaux (Viret & Gindro, 2014). Auparavant, ce sont surtout le soufre et le cuivre qui étaient mobilisés contre les maladies fongiques (Viret & Gindro, 2014). Il est possible de modéliser les tendances futures à ce que la vigne soit impactée par les ravageurs et champignons qui sont directement liés à certaines conditions météorologiques et/ou climatiques (Zito et al., 2018). Par exemple on peut s'attendre, en cas de hausse des températures de l'air de la période végétative et d'une baisse de l'humidité relative, à une augmentation de la présence d'eudémis et à une diminution de celle de cochylis (Linder et al., 2016). Des modèles de prévisions de risques fongiques permettent de traiter les cultures aux moments opportuns, afin d'éviter une contamination importante (Viret & Gindro, 2014). Pour certains ravageurs et pour les deux principales maladies fongiques de la vigne en Suisse, on utilise des relevés météorologiques et calcule les risques via des modèles mathématiques provenant de la littérature scientifique, afin d'aider les viticulteurs à savoir quel est le moment opportun pour agir et lutter. Agrométéo est la plateforme d'Agroscope³ qui effectue ce travail en Suisse.

1.4.2. Les indices bioclimatiques

On retrouve généralement la température moyenne de l'air dans la littérature scientifique sous différentes formes qui permettent de caractériser les divers climats viticoles ainsi que la phénologie de différents cépages, et donc l'influence qu'exerce la température sur la qualité du raisin/ du vin produits. Souvent, les travaux de recherche autour de cette thématique s'inscrivent dans un contexte de changements climatiques. Différents indices bioclimatiques ont alors été mis au point pour caractériser les conditions d'un lieu et son adéquation pour la vigne comme l'indice de Winkler, l'indice héliothermique de Huglin (IH), l'indice des nuits fraîches (CI) et les GDDs (growing degree days), qui diffèrent des indices de Winkler et Huglin (Jones et al., 2005; Seguin, 2007, et d'autres; Tonietto & Carbonneau, 2004). Grâce à ces indices, il a été possible d'établir les impacts d'une hausse des températures sur la teneur en sucre des vins et sur la phénologie de la vigne notamment. La GST peut servir à démontrer

³ <https://www.agrometeo.ch>

l'adaptabilité potentielle d'un terroir à différents cépages en utilisant le seul critère de la température de l'air (Figure 1.3).

Grapevine Climate/Maturity Groupings

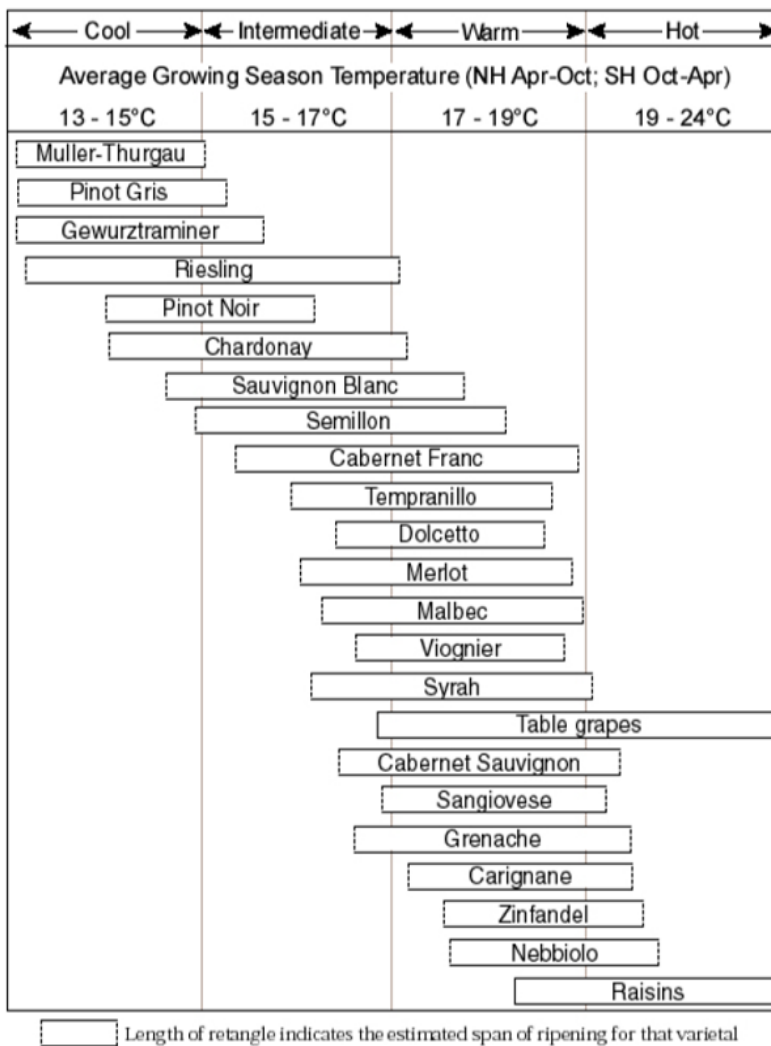


Figure 1.3. Adéquation bioclimatique des cépages en fonction de la température moyenne de la période végétative de la vigne (GST). Les bornes traitillées indiquent une marge d'erreur allant de 0.2 à 0.5 degrés.

Source : Jones (2006)

L'indice de Huglin est quant à lui fortement corrélé avec un taux de sucre adéquat aux vendanges (Huglin & Schneider, 1998). Il peut donner une idée d'optimum climatique pour la culture de différents cépages. Les indices de fraîcheur des nuits (CI et PHCI (Indice de fraîcheur des nuits d'avant vendanges)) sont quant à eux important pour caractériser la présence de température fraîche avant les vendanges. Bénéficier d'une température nocturne

relativement fraîche avant les vendanges est important pour la composition aromatique et la couleur des vins (Kliewer, 1973b; Kliewer & Torres, 1972; Tonietto & Carbonneau, 2004), notamment pour le Pinot noir (Nicholas et al., 2011; Shaw, 2012).

Table 1.1. Indices bioclimatiques, équations, période de calcul pour les équations pour l’hémisphère nord et sources littéraires, adapté de Jones et al. (2005), Blanco-Ward et al. (2007), et OIV (2012).

Indice bioclimatique	Équation	Période	Source
Indice de Winkler (WI)	$\sum(T_{moy} - 10)$	1 ^{er} avril au 31 oct.	Amerine and Winkler (1944)
Indice héliothermique de Huglin (IH)	$k * \sum \left(\frac{T_{moy} + T_{max}}{2} - 10 \right)$	1 ^{er} avril au 30 Sep.	Huglin (1978)
Indice de Branas (BHI)	$\sum(T_{moy} - 10) * \sum(Ie * 10^{-6})$	1 ^{er} avril au 31 oct.	Branas (1974)
Degrés jours biologiquement effectifs (BEDD)	$\sum \min\{\max[T_{moy} - 10; 0]; 9\}$	1 ^{er} avril au 31 oct.	Gladstones (1992)
Somme des températures moyennes (SAT)	$\sum(T_{moy} > 10)$	1 ^{er} avril au 31 oct.	Jones and Davis (2000)
Température moyenne de la période végétative (GST)	moyenne(T_{moy})	1 ^{er} avril au 31 oct.	Jones et al. (2005)
Indice de fraîcheur des nuits (IF)	moyenne(T_{min})	Septembre	Tonietto and Carbonneau (2004)
Indice de fraîcheur des nuits d’avant vendanges (IFAV)	$= \frac{1}{30} \sum_{Hd-30}^{Hd} T_{min}; Hd$ correspond à la date moyenne des vendanges		Comte et al. (2021)
Indice de Fregoni (FI)	$\sum(T_{max} - T_{min}) * \sum N_d T < 10$	Septembre	OIV (2012)
Indice de sécheresse (DI)	$\sum W_o + P - T_v - E_s$	1 ^{er} avril au 30 Sep.	Riou et al. (1994)
Indice hydrothermique (Hyl)	$\sum T_{moy} * P$	1 ^{er} avril au 30 Sep.	(Branas, 1974)

T_{max} correspond à la température maximale journalière, T_{min} à la température minimale journalière

et T_{moy} à la température journalière moyenne $((T_{max}+T_{min})/2)$. k est une valeur constante qui dépend de la latitude et varie entre 1.02 et 1.06, le correspond au rayonnement effectif, d est le nombre de jours où $T < 10^{\circ}C$, W_0 correspond à la réserve hydrique du début de la période, P correspond aux précipitations, T_v correspond au potentiel d'évapotranspiration, E_s correspond à l'évapotranspiration du sol.

La GST et l'HI sont particulièrement intéressants pour illustrer la possibilité bioclimatique de cultiver un cépage. Ils permettent notamment en utilisant les scénarios climatiques pour le futur (RCP4.5 et RCP8.5) d'anticiper l'adéquation climatique de nouveaux cépages dans des terroirs donnés, comme l'inadéquation future de cépages traditionnels. Ceci présente notamment l'avantage de pouvoir anticiper de possibles solutions d'adaptation aux changements climatiques.

Pour classer les types de climats viticoles dans le monde et donner une idée des possibilités de culture de cépages, Tonietto et Carbonneau (2004) proposent le « Géoviticulture Multicriteria Climatic Classification System (GMCCS) », une méthode de classification basée sur trois indices bioclimatiques (l'indice de sécheresse, l'indice de Huglin et l'indice de fraîcheur des nuits). De nombreuses études utilisent différents indices bioclimatiques pour anticiper les changements subis, ainsi que ceux que subiront les vignobles dans les prochaines décennies, nous en citons ici quelques exemples. Santos et al. (2012) proposent une analyse à l'échelle macro des zones viticoles européenne au travers de plusieurs indices bioclimatiques (CI, DI, HI, WI et un indice composite), avec des données allant de 1950 à 2009. Fraga et al. (2017), par le biais de l'indice de Winkler et de l'indice de sécheresse, montrent que la profession vinicole du Portugal devra s'adapter à court et long termes aux changements à venir. Gaitán et Pino-Otín (2023) montrent que l'Espagne devrait substantiellement se réchauffer en reprenant les indices du GMCCS et en y ajoutant l'indice hydrothermique (Hyl), ainsi que des indices composites. Nesbitt et al. (2022) montrent que Le Royaume-Uni aura, du point de vue des indices bioclimatiques (GST, GDD et un indice pluviométrique), un potentiel à produire des vins de qualité, notamment avec du Pinot noir, d'ici le milieu du siècle.

1.4.3. Adaptations à la vigne et en cave

Il y'a plusieurs possibilités d'adaptation à court ou moyen terme au changement climatique.

Ces dernières décennies, la vitiviniculture s'est adaptée de diverses manières à la hausse globale des températures de l'air.

Adaptation de la pratique culturale

Les moyens préconisés actuellement en termes d'adaptation sont techniques et réactifs. Il existe un panel de moyens et de méthodes relativement riche et qui dépend des contextes propres à chaque vignoble. On peut les classer en deux catégories, la première étant l'adaptation de la pratique culturale et la seconde l'adaptation en cave.

Certaines méthodes s'appliquent rapidement et donc à court terme, comme l'irrigation, l'entretien du sol, l'écimage, ou encore une modification du rapport feuilles-fruits. D'autres nécessitent plus de temps et des changements plus radicaux, comme le changement du cépage, du clone ou du porte-greffe, la pratique de l'agroforesterie, ou encore un décalage altitudinal.

L'adaptation de la pratique culturale se traduit à nos latitudes par une taille tardive pour repousser le débourrement (Friend & Trought, 2007). Elle est déjà souvent pratiquée dans les vignobles les plus au nord pour influencer sur le risque de gel printanier, puisqu'en retardant le débourrement on diminue le risque.

Valentini et al. (2019) ont également démontré avec du Sangiovese qu'un écimage des feuilles après la véraison permettait de diminuer les sucres sans affecter la récolte quantitativement comme qualitativement. D'autres travaux semblables ont également été effectués en Bourgogne (Bois et al., 2022) et en Valais (Murisier & Zufferey, 1997) avec des effets semblables pour respectivement le Pinot noir et le Chasselas. Cette technique pourrait éventuellement être mise à profit dans le vignoble neuchâtelois pour le Pinot noir les années chaudes et fortement ensoleillées pour réduire le taux de sucre et donc d'alcool potentiel.

On peut aussi intervenir par l'irrigation, en essayant de se retrouver dans une situation où la contrainte hydrique demeure modérée durant la maturation (Choné et al., 2001; Deloire et al., 2005; van Leeuwen & Vivin, 2008). Cela consiste à contrer un stress hydrique trop important par une adaptation de la conduite de la vigne, comme par exemple l'installation d'un système d'arrosage au goutte à goutte (Choné et al., 2001), et/ou du matériel végétal (Deloire et al., 2005; Parker et al., 2015; van Leeuwen & Seguin, 1994). Dans la même optique, il est possible de cultiver certaines espèces végétales (ex : la fétuque roseau, du ray-grass anglais, de l'orge, du blé, de l'avoine, etc.) l'hiver dans les vignes, et de les faucher au

printemps ou au début de l'été. Ces plantes auront comme impact de servir d'engrais, de retenir l'humidité une fois séchées, et elles formeront alors une sorte de paillis végétal. (Celette et al., 2008). L'autre avantage qu'offre cette pratique est qu'elle augmente l'infiltration dans les sols de l'eau de pluie (Celette et al., 2008; Moret et al., 2006). Augmenter l'espace entre les lignes de ceps permet également de réduire le stress hydrique et donc de contrer les effets négatifs de la sécheresse (Van Leeuwen et al., 2019).

Il est également possible de diminuer le rapport feuille-fruit pour retarder la maturation et ainsi diminuer le taux de sucres potentiel (Martínez de Toda & Balda, 2013; Van Leeuwen et al., 2019). Cela se traduit par une limitation de la surface foliaire ou celle du rendement (nombre de grappes par cep), en optimisant le rapport surface foliaire/nombre de grappes (Murisier & Zufferey, 1997). Il est aussi possible de choisir un porte-greffe plus résistant à la sécheresse (Choné et al., 2001; van Leeuwen et al., 2003). On peut également remplacer certains clones par d'autres plus adaptés aux températures élevées et/ou à la physiologie moins rapide par la sélection génétique (Dequin et al., 2017). Il est aussi possible de réduire l'impact des vagues de chaleur sur la vigne en pratiquant de l'agroforesterie (Bourgade et al., 2020). Avec des haies ou arbres implantés dans le vignoble, on diminue le rayonnement incident. On peut également créer un écosystème favorable à la captation dans les sols des eaux de pluie et à la biodiversité (population microbienne du sol, et certains insectes et arthropodes), ce qui modifie légèrement le microclimat (Bourgade et al., 2020; Fraga et al., 2017; Veste et al., 2020). Ceci car l'évapotranspiration des arbres peut tendre à rafraîchir les températures de l'air et donc la vigne pendant les journées estivales (Bourgade et al., 2020). Avec la présence d'arbres, il est ainsi possible de gagner quelques degrés en moins durant les pics de chaleur (Bourgade et al., 2020; Renaud & Rebetez, 2009). Néanmoins cette méthode présente également des effets potentiellement négatifs et nécessite encore des études, car le champ de recherche demeure peu exploré (Favor & Udawatta, 2021). Les arbres nécessitant de grandes quantités d'eau et de minéraux pour leur croissance, la concurrence hydro-minérale des arbres avec la vigne peut également affecter cette dernière avec par exemple une diminution des rendements, une vigueur plus faible, des carence azotée, ou encore une modification de la composition aromatique des vins (Lang et al., 2019). En fonction des essences d'arbres utilisés et de la distance de ceux-ci avec la vigne, on obtient des résultats différents. Bourgade et al. (2020) ne mesurent pas de différence au niveau de la vigueur des vignes cultivées traditionnellement et celles en agroforesterie, ni de perte de rendement,

toutefois les arbres utilisés dans l'étude sont encore jeunes et n'offrent pas beaucoup d'ombre. On peut également imaginer remplacer les arbres par des systèmes mécaniques pour amener de l'ombre et notamment des panneaux solaires amovibles. Des tests sont actuellement effectués en France dans le vignoble (projet Sunagri de l'INRAE). Néanmoins cette solution-ci n'apporterait de la fraîcheur que par l'ombre qu'elle procure, on peut donc attendre une efficacité moindre.

Adaptation en cave

On peut également intervenir en cave pour influencer sur la qualité du vin, soit après la récolte. Cela se traduit par une adaptation du travail œnologique. Il s'agit alors de mettre à profit des procédés techniques ou chimiques pour influencer sur les composants du vin. L'ajout de SO₂ permet de stabiliser les vins quand le pH est trop élevé (van Leeuwen & Darriet, 2016). Un choix de levures qui synthétisent moins de sucre en alcool comme la levure Lalvin EC118® ou des levures appartenant au genre *Saccharomyces* permettent d'obtenir des vins avec un degré d'alcool moindre. Les résultats de Dequin et al. (2017) relatifs à ces levures (EC118 et *Saccharomyces*) montrent une diminution de l'éthanol de l'ordre de 0.45 à 0.80% (vol/vol), plus élevée que celles provoquées par les autres levures utilisées dans l'étude.

Dequin et al. (2017) relèvent également l'existence de technologies de filtres qui permettent de diminuer le taux d'alcool en amenant peu d'effets négatifs sur le potentiel aromatique des vins. Il existe également des techniques de désalcoolisation partielle comme l'évaporation thermique, la séparation transmembranaire, la distillation sous vide, les colonnes à cônes rotatifs ou encore l'osmose inverse (Samson et al., 2016).

Malgré l'existence d'un panel riche et varié de moyens d'adaptation, ceux-ci possèdent des limites au niveau de l'efficacité ou se caractérisent par des seuils au-delà desquelles ils peuvent impacter négativement le goût des vins produits (Samson et al., 2016).

Ces moyens techniques ne seront probablement pas suffisants à long terme, surtout pour les cépages qui sont déjà à la limite des possibilités climatiques de culture. Par exemple, en se fiant aux optimums climatiques de Jones (2006), on peut déjà se demander s'il est encore raisonnable de cultiver du Muller-Thurgau à Neuchâtel. Les températures moyennes annuelles sont déjà suffisamment élevées pour qu'il se retrouve largement en dehors de sa niche. Les mesures d'adaptations peuvent toutefois peut-être encore suffire à permettre une production de vins de qualité avec ce cépage.

Même si les méthodes décrites ci-dessus offrent un certain potentiel d'adaptation, il n'est pas certain que cela soit suffisant à long terme, notamment avec un scénario d'émissions de gaz à effet de serre proche de RCP8.5. Si aucun effort ou presque n'est entrepris mondialement pour drastiquement diminuer les émissions mondiales de gaz à effet de serre, même un mélange de ces solutions possibles devrait être insuffisant à long terme (au-delà de 2050) pour garantir la pérennité de la culture des cépages les moins thermophiles du vignoble neuchâtelois.

À long terme, dans le cas où le climat se dirigerait vers un scénario proche de RCP8.5, ou à la version actualisée de ce scénario SSP5-8.5, il demeurerait deux possibilités d'adaptation dans une région comme celle de Neuchâtel : changer l'encépagement et/ou déplacer les cépages traditionnels là où le climat est désormais plus favorable (Morales-Castilla et al., 2020; Moriondo et al., 2013; Wolkovich et al., 2018). Il s'agirait de déplacer les cépages les plus touchés par cette hausse des températures de l'air à une altitude plus élevée ou dans des zones où les températures sont globalement plus basses, soit dans des zones en cuvettes, ou alors où l'orientation est moins ensoleillée. Un travail de prospection, afin de déterminer les disponibilités en termes de sol à des altitudes plus élevées que celles admises actuellement, peut s'avérer utile dans cette optique. Pour un vignoble situé dans une région historiquement fraîche comme c'est le cas de celui de Neuchâtel, cela peut se traduire également par une opportunité de cultiver des cépages plus méridionaux dans la région, comme le Merlot, la Syrah ou le Cabernet-Sauvignon. La variabilité climatique interannuelle étant élevée à Neuchâtel, il est possible que certaines années demeurent néanmoins encore trop fraîches pour amener à bonne maturation ces cépages. La modélisation du climat futur, avec différents scénarios, peut montrer à partir de quand ces cépages peuvent être cultivés à moindre risque.

1.4.4. La modélisation climatique et les scénarios climatiques futurs

Étant donné que la vigne ne donne des récoltes cultivables que 4 ans après la plantation, et qu'on plante une vigne pour la cultiver plusieurs décennies, il est pertinent d'utiliser des scénarios climatiques pour avoir une idée du climat futur dans un contexte de changements climatiques, pour éviter de planter des cépages qui souffriront des conditions futures. Plusieurs modèles globaux climatiques (GCMs pour *Global climate models*) ont été mis au point afin de simuler les changements climatiques dans les décennies à venir en fonction de

niveaux d'émissions de gaz à effet de serre (Figure 1.4.).

Les modèles globaux ont été dérivés pour permettre la création de modèles plus fins à des échelles régionales (RCMs pour *Regional climate models*). De manière générale, on sait déjà que la hausse des températures estivales en Europe est sous-estimée pour la majorité de ces modèles, plusieurs effets induits par une modification de la composition atmosphérique ayant été sous-estimés ou surestimés (Boé et al., 2020; Schwingshackl et al., 2019; Sørland et al., 2018; Vautard et al., 2021).

En fonction des différents scénarios (Figure 1.5), on observera des hausses de la température de l'air plus ou moins élevées à l'avenir en Suisse. Le scénario le plus optimiste, RCP2.6, correspond à une réussite des accords de la COP21 à Paris, ce qui implique une baisse drastique des émissions mondiales de gaz à effet de serre dès les années 2020. Avec ce scénario, la Suisse connaîtrait une petite hausse, puis une stabilisation des températures de l'air dans les décennies à venir (Figure 1.5). Ce scénario semble malheureusement déjà impossible à atteindre, tant les efforts fournis à l'échelle internationale sont faibles jusqu'à aujourd'hui. À l'autre extrême, on retrouve RCP8.5, scénario qui correspond à une dépendance maintenue envers les énergies fossiles. Avec ce scénario, la température annuelle moyenne de l'air en Suisse pourrait augmenter de 4 à 7 degrés d'ici la fin du siècle (Figure 1.5). Le scénario RCP4.5, correspond à une diminution progressive de la consommation des énergies fossiles dès les années 2030, et une transition vers les énergies durables d'ici les années 2050. Ce scénario est probablement le plus optimiste encore atteignable pour l'humanité, c'est pourquoi nous le qualifions ici de « modéré ».

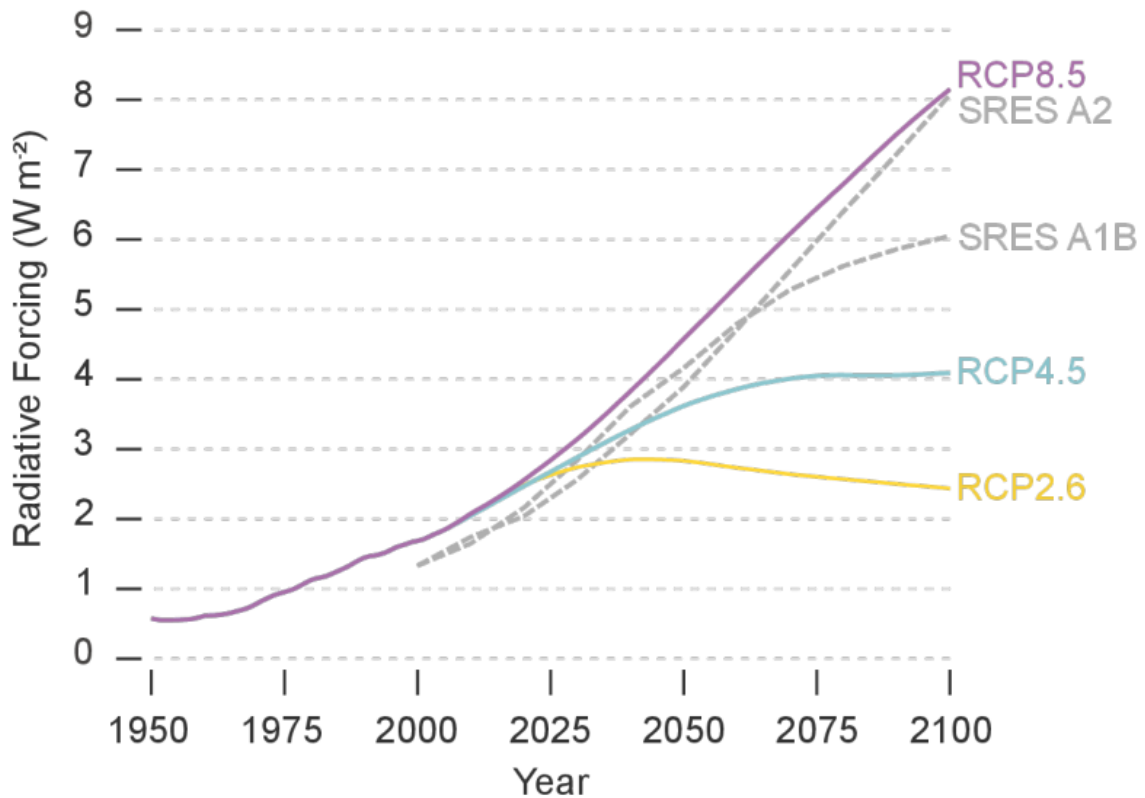


Figure 1.4. Principaux scénarios de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et leurs implications temporelles sur le forçage radiatif terrestre.

Source : (CH2018, 2018)

Pour la Suisse, le National Center for Climate Services (NCCS), met à disposition de la recherche scientifique plusieurs jeux de données issus des différents RCMs. Ces jeux de données contiennent des températures journalières simulées qui tiennent compte de la variabilité climatique interannuelle caractéristique des différentes régions pour plusieurs scénarios climatiques. Ainsi, il existe des données climatiques simulées pour la station de MétéoSuisse de Neuchâtel provenant de 22 RCMs et pour différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6). Sur ces 22 jeux de données, 6 n'ont de données que pour RCP8.5, les autres ont au moins RCP8.5 et RCP4.5, et parfois également RCP2.6.

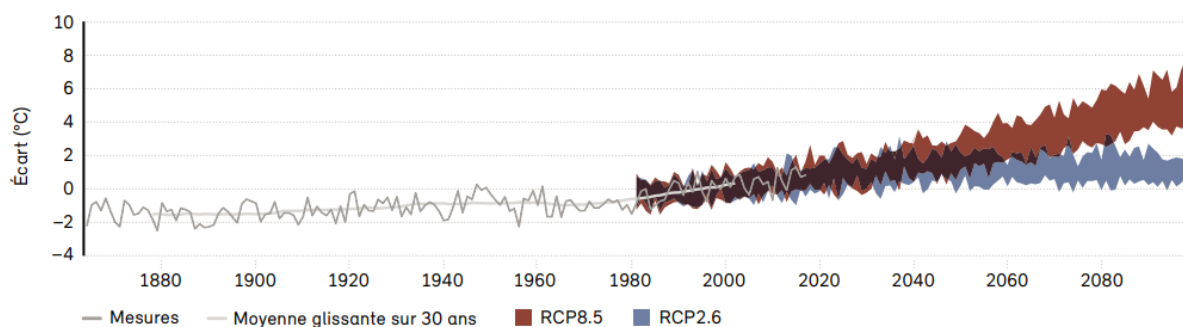


Figure 1.5. Températures de l’air en Suisse mesurées et modélisées pour le futur avec les deux scénarios les plus extrêmes, RCP2.6 et RCP8.5.

Source : CH2018 (2018)

1.5. Problématique

La vigne est particulièrement dépendante du climat et donc impactée par les changements climatiques. La vigne une fois plantée ne donne pas de récolte les quatre premières années et c’est une plante qu’on cultive dans l’optique de la faire perdurer sur plusieurs décennies. Il est donc particulièrement important pour les vignerons d’avoir une idée de quelles seront les conditions climatiques dans les prochaines décennies. Il est ressorti de nos discussions avec la profession qu’il y avait une volonté également de connaître les possibles changements dans les risques climatiques tels que les vagues de chaleur, qui peuvent causer un stress hydrique important, ainsi que les risques de faire face au gel printanier, ou encore une possible modification de l’aire de répartition des ravageurs et maladies de la vigne.

1.5.1. Questions de recherche

- 1. Comment le climat viticole neuchâtelois a-t-il changé du point de vue des indices bioclimatiques ?**
- 2. Comment le climat viticole neuchâtelois changera-t-il dans les prochaines décennies en fonction des scénarios climatiques futurs RCP4.5 et RCP8.5 ?**

Par le biais de combinaisons entre observations et données simulées pour le futur climatiques et phénologiques, un maximum de résultats possibles ont été produits dans le but de

répondre aux buts susmentionnés de ce projet.

Certaines préoccupations n'ont pas pu être abordées, par manque de connaissances scientifiques. C'est le cas par exemple pour le lien entre le climat et les maladies fongiques (mildiou et oïdium). Il n'a donc pas été possible d'aborder la modélisation des dynamiques futures de ces maladies cryptogamiques. La situation est analogue avec le risque de grêle. La rareté des phénomènes de grêle rend compliquée sa modélisation (Raupach et al., 2021). Toutefois, cette question est traitée par d'autres acteurs en Suisse. On a ainsi une meilleure connaissance du risque de grêle en Suisse grâce au projet « Climatologie de la grêle en Suisse » conduit par le NCCS⁴ qui s'est terminé fin avril 2021. Il en est ressorti que le risque de grêle demeurerait assez élevé le long de la chaîne du Jura, et donc pour le vignoble neuchâtelois. De manière générale, les résultats indiquent qu'il faut s'attendre à une augmentation du nombre d'orages à grêlons de grande taille, et une diminution du nombre d'orages de grêle de petits grêlons (NCCS).

1.5.2. Buts de la thèse

Cette thèse en climatologie appliquée s'inscrit dans un projet de recherche qui fait partie de la phase II du programme pilote « adaptations aux changements climatiques » de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

L'objectif de ce projet est de mieux connaître les impacts des changements climatiques sur le vignoble neuchâtelois. Le but du projet est donc de fournir des résultats d'analyses scientifiques qui permettront d'envisager les conséquences passées, présentes et futures des changements climatiques. Ces résultats devraient par ailleurs permettre à la profession viticole d'envisager des mesures d'adaptation à entreprendre à court et moyen terme.

Il s'agit dans un premier temps d'évaluer les implications du changement climatique sur le vignoble neuchâtelois en se basant sur différents indices bioclimatiques pour des échéances passées et présentes. Puis la modélisation d'indices bioclimatiques par le biais de nouveaux scénarios climatiques suisses (CH2018, 2018) donnera une idée des changements climatiques

⁴ <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/climatologie-grele-suisse.html>

à venir pour la viticulture. Enfin, il s'agit de porter le regard sur d'autres conséquences du changement climatique que sont les vagues de chaleur, la répartition des ravageurs viticoles et le risque de gel printanier.

Des réunions annuelles ont eu lieu en 2019 et en 2021, afin de présenter l'avancement du projet et de discuter des résultats obtenus avec la profession viticole neuchâteloise. La réunion de 2020 a dû être annulée en raison de la pandémie de SARS-COV-2. La réunion de 2019 nous a permis d'intégrer des analyses qui n'étaient pas prévues initialement puisque plusieurs vigneronns nous ont fait part de leurs craintes vis-à-vis d'une possible tendance à l'augmentation du risque de gel printanier. Ces réunions nous ont également permis de discuter avec la profession des solutions d'adaptation envisageables pour les décennies à venir.

En sommes, les résultats doivent permettre la prise de décisions politiques en matière de cadastre et de cépages autorisés à la culture à plus ou moins long terme, ainsi qu'une meilleure idée des possibilités d'adaptation à l'échelle parcellaire pour la profession vitivinicole.

Un rapport a été rédigé et fourni à l'OFEV en 2021.

Cette thèse par articles s'inscrit dans le cadre de ce projet. Trois articles scientifiques ont ainsi été rédigés. Le premier article, « Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland », a pour but d'offrir une modélisation des changements climatiques viticoles passés et présents au travers d'indices bioclimatiques. Le deuxième article, « Future climatic conditions may threaten adaptation capacities for vineyards along Lake Neuchâtel, Switzerland », a pour but de modéliser comment le climat viticole changera dans les décennies à venir au travers de ces mêmes indices bioclimatiques. Le troisième article, « Climate change is likely to favour polyvoltine and invasive insect species, leading to more damage in the mid-latitude vineyards of Neuchatel », aborde la modélisation de l'adéquation climatique dans le vignoble neuchâtelois avec un focus sur deux des principaux ravageurs viticoles, *Scaphoideus titanus* et *Lobesia bostrana*.

1.6. Méthodologie générale

Les premières analyses réalisées dans le cadre de cette thèse consistaient en un diagnostic de

l'impact des changements climatiques passés et présents sur le vignoble neuchâtelois au travers des indices bioclimatiques les plus pertinents. Les résultats obtenus ont fait l'objet du premier article publié. Plus précisément, l'analyse s'est portée sur deux indices bioclimatiques, la température moyenne de l'air de la période végétative de la vigne (GST) et l'indice héliothermique de Huglin (HI). Ces indices bioclimatiques sont usuellement utilisés pour déterminer le zonage viticole, soit les possibilités de cultiver certains cépages en fonction du climat (OIV, 2012). Afin de mieux illustrer comment la hausse des températures de l'air impacte l'adéquation climatique du vignoble neuchâtelois aux différents cépages, les optimums pour le Pinot noir (cépage principalement cultivé à Neuchâtel) et le Merlot (cépage qui intéresse bon nombre de vignerons et vigneronnes) sont illustrés dans les différents résultats. Pour ces indices bioclimatiques, la variabilité interannuelle a été considérée. Ceci car le climat estival de la région peut varier significativement d'une année à l'autre. Les résultats obtenus proposent une sorte de marge de sécurité et donc permettent d'estimer une probabilité d'avoir 90% à 95% des années qui dépassent un certain seuil climatique. Dans ce premier article, d'autres analyses ont été réalisées. Elles traitent de l'évolution de la température nocturne qui précède les vendanges au travers de deux indicateurs, l'indice de fraîcheur des nuits (CI) et l'indice de fraîcheur des nuits d'avant vendanges (PHCI). Les données utilisées sont celles des stations météorologiques de MétéoSuisse, Agrométéo et de l'institut de géographie (mais uniquement de ST001 à ST019, Annexe 1) qui se trouvent dans la région du littoral neuchâtelois, ou à proximité dans une configuration géographique identique. Nous avons également utilisé les dates de vendanges de la station viticole d'Auvernier de 1970 à 2019 pour l'indice PHCI.

Pour le deuxième article, nous avons modélisé les tendances climatiques futures selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 pour deux indices bioclimatiques, le GST et l'indice de Huglin. Les données utilisées ont été celles mesurées pour la période récente (Annexe 1), ainsi que la base de données CH2018 ((CH2018, 2018) pour les valeurs futures. L'ensemble de ces jeux de données permet de mettre en lumière quels sont les RCMs qui reproduisent le mieux le climat passé et présent, soit lesquels sont en phase avec les tendances obtenues avec les valeurs mesurées et donc les plus à même de modéliser les changements climatiques en Europe centrale. Pour illustrer les résultats aux travers de séries temporelles, nous avons utilisé un filtre Kolmogorov–Zurbenko (Zurbenko & Smith, 2018). Nous avons utilisé l'ensemble des jeux

de données disponibles et avons analysé les tendances au travers de seuils climatiques.

Le RCM SMHI-RCA4_ECEARTH_EUR11 correspondant le mieux avec les tendances des valeurs mesurées, nous avons produits des analyses plus fines avec ce RCM, notamment des cartes climatiques pour le milieu et la fin de siècle selon les scénarios climatiques RCP4.5 et RCP8.5.

Pour le troisième article, nous avons modélisé et analysé l'adéquation climatique future du vignoble neuchâtelois aux insectes ravageurs, avec un focus sur deux espèces spécifiques : *Lobesia botrana* et *Scaphoideus titanus*. Dans cet article nous analysons au préalable l'adaptabilité future des ravageurs viticoles au vignoble neuchâtelois au travers de « growing degree days » (GDDs) pour avoir une idée générale des tendances futures. Nous analysons ensuite plus spécifiquement l'adaptabilité future de deux espèces ravageuses, l'eudémis de la vigne et la cicadelle de la vigne, en fonction d'indicateurs bioclimatiques pertinents. Nous avons réalisé nos analyses avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 également. Les données utilisées sont les mêmes que pour celles du deuxième article. Nous avons analysé la tendance hypothétique à rencontrer une troisième génération de *Lobesia botrana* à l'avenir, contre deux actuellement, ainsi que les dates moyenne de début de vol de cette espèce. Pour *Scaphoideus titanus*, nous avons analysé le nombre moyen d'œufs par femelle pour plusieurs périodes (passé récent, milieu du siècle et fin de siècle), ainsi que la date moyenne de la première infection pour les mêmes périodes.

L'ensemble des résultats ont été produits à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2019). Le logiciel Adobe Illustrator a également été utilisé pour faire apparaître des points géographiques sur les cartes et finaliser la présentation graphique des résultats. Les cartes de localisation du vignoble neuchâtelois ainsi que de l'emplacement des vignobles ont été produites avec le Logiciel QGIS (Congedo, 2021).

2. Effets du changement climatique sur les indices bioclimatiques relatifs au vignoble neuchâtelois.

Titre original de l'article : Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland.

Valentin Comte^{1,2}, Léonard Schneider^{1,2}, Pierluigi Calanca³, Martine Rebetez^{1,2}

¹University of Neuchatel, Institute of Geography, Neuchatel, Switzerland

²Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Neuchatel, Switzerland

³Agroscope Reckenholz, Zurich, Switzerland

Abstract

In this study, we investigated the consequences of climate change on bioclimatic indices in vineyards along the edge of Lake Neuchatel in Switzerland. Like in other vineyards all around the world, the typicity of wines and the phenology of vines have changed, particularly since the 1970s. Trends in the growing season average temperature and in Huglin's heliothermal index show that the climate in the Neuchatel vineyards changed from very cool or cool to temperate during the last decades. Trends in the cool night index and in the prior to harvest cool night index both indicate that in the near future this wine region will frequently experience temperate instead of cool nights during the weeks leading up to harvest. Our results highlight the need for adaptation strategies, such as an upward elevational shift for Pinot Noir, as climatic conditions will become too warm at its current location in the next decades. They also show that conditions in this region are already favorable for more thermophilic varieties such as Merlot. In the context of global warming, this kind of analysis should be conducted throughout winegrowing regions in order to develop efficient adaptation strategies at the microclimatic scale.

Keywords

adaptation · bioclimatic index · climate change · grapevine · Switzerland · viticulture

Acknowledgments

This research was funded by the Swiss Federal Office for the Environment (pilot program 'Adaptation to climate change'), the canton of Neuchatel, winegrowing municipalities and wine producers' associations. Part of the temperature data was provided

by MeteoSwiss (Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology) and Agrometeo by Agroscope (Swiss centre of excellence for agricultural research). Harvest data were provided by Sebastien Cartillier, former director of the *Station viticole cantonale* of Neuchatel. The vineyard location shapefile was provided by the SITN (*Système d'information du territoire neuchâtelois*). The authors are grateful to Melissa Dawes for useful comments and suggestions for improving the manuscript and to Constant Signarbieux and Geoffrey Klein for their statistical advice.

2.1. Introduction

Grapevines are cultivated in specific regions according to the particular temperature needs of each variety and to a process of selection and experimentation conducted by winegrowers (Huglin & Schneider, 1998; G. Jones, 2007; Moriondo et al., 2013; Unwin, 2005). This process explains the existence of wine regions, which are characterized by specific wine typicities (G. Jones, 2007). It has been shown that, in addition to climate, other elements play an important role in the production of quality wines, such as soil type and depth, cultural and oenological practices, evapotranspiration, rooting depth, leaf area, and the interactions between all these factors (Huglin & Schneider, 1998). As an example, slight water stress, which depends on rainfall, temperature, and leaf area, improves wine quality (Spring & Zufferey, 2009; van Leeuwen & Vivin, 2008), but excessive water stress has negative impacts. Winegrowers have the possibility to reduce these impacts by using an irrigation system (Santillán et al., 2019; van Leeuwen & Vivin, 2008).

Weather conditions are still considered the most important factor for viticulture (Jones & Davis, 2000; van Leeuwen et al., 2004). Numerous studies have shown that rising air temperatures undoubtedly have an impact on the phenological development stages of grapes (e.g. Cook & Wolkovich, 2016; Cuccia et al., 2010; Duchêne & Schneider, 2005; Fraga et al., 2016; Jones & Webb, 2010; Lebon, 2002; Seguin & Garcia de Cortazar, 2005; Tomasi et al., 2011; Urhausen et al., 2011). Air temperature rise, combined with ever-earlier grape harvests, changes the typicity and character of the wines produced (Jones & Webb, 2010; Spayd et al., 2002; van Leeuwen & Darriet, 2016). Thus, the final sugar concentration and potential alcohol content of wines both tend to increase, while total acidity decreases (Battaglini et al., 2009; De Orduna, 2010). Other aromatic and phenolic elements are also altered (De Orduna, 2010;

Dequin et al., 2017). Cool conditions prior to harvest are known to positively influence total phenolics, and to give wine a specific color (Kliewer, 1973a; Kliewer & Torres, 1972; Moriondo et al., 2013), particularly for Pinot Noir (Nicholas et al., 2011; Shaw, 2012). Thus, the composition of grapes changes considerably with an overall rise in air temperature, modifying the typicity of the wines.

Beyond rising temperatures, it has been shown that climate change could lead to an increase in spring frost risk, in heat wave duration and occurrence, and in solar radiation, all of which increase the risk of sunburn to grapevines (Sgubin et al., 2018; Stock et al., 2005). Further, climate change is expected to result in a shift in the geographic distribution of different pathogens and insect pests, which is likely to increase the risk of disease and infestation in winemaking regions with historically cold climates, i.e., 13–15°C on average for the grapes' growing period (Boudon-Padieu & Maixner, 2007; Tate, 2001).

As regional implications of climate change and adaptation possibilities differ for each vineyard, it is necessary to focus on studies at the local scale (Pons et al., 2017; Ramos Martín et al., 2018), taking winegrowers into account in order to suggest manageable adaptation solutions (Boyer, 2016).

Changing climatic conditions will progressively result in a latitudinal shift of the vine suitability zone (Jones & Alves, 2012; Jones et al., 2005). In particular, southern vineyards in the Northern Hemisphere will probably become too hot for producing high-quality wines (Stock et al., 2005). It is expected that long-term adaptation solutions for vineyards in other regions will involve the introduction of new varieties (more thermophilic and/or resistant to pests and pathogens) and/or an elevational shift (Jones et al., 2005; Schultz, 2000).

In Switzerland, the mean annual temperature increased by 1.8°C between the beginning of temperature measurements in 1864 and 2016 (MeteoSwiss, 2016). Rebetez and Reinhard (2008) observed that the trend reached +0.57°C per decade from 1975 to 2004. Thus, climate warming in Switzerland is currently more than twice the average over the Northern Hemisphere. The temperature rise is not uniform through the year: spring and summer are warming more than winter and autumn. This point is crucial for viticulture, as the vine growing season extends from 1 April to 31 October. The beginning and middle of the growing season are therefore warming more than the end, with September having the smallest temperature increase.

Air temperature impacts on grapevines are well known and considered the main determining factor for the development of this cultivated plant, particularly for bringing it to maturity (Huglin & Schneider, 1998). Using air temperature data, a large number of bioclimatic indices have been developed (Table 2.1.). They indicate the suitability of each region for producing specific vine varieties (Briche et al., 2014; Huglin & Schneider, 1998). Most consist of a heat accumulation of degree days with a 10°C lower limit, such as the Winkler index (Amerine & Winkler, 1944), Huglin's heliothermal index (Huglin, 1978), Branas' heliothermal index (Branas, 1974), biologically effective degree days (Gladstones, 1992), and the sum of average temperature (Jones & Davis, 2000). Huglin's heliothermal index (HI) has been used to define vine culture availability for some varieties. It offers the highest correlation coefficient with sugar content, which represents grape maturity (Huglin & Schneider, 1998). Sugar is the most important factor for producing high-quality wine in cool climate regions, especially when the grape varieties are close to their low-temperature limits of possible cultivation (Huglin & Schneider, 1998). By contrast, maintaining acidity is the most important challenge in warm climate regions (Huglin & Schneider, 1998). The growing season average temperature, used by Jones et al. (2005), defines the suitability for growing specific grape varieties by considering the average temperature of the growing season (1 April to 31 October; GST). The cool night index (CI) (Tonietto & Carbonneau, 2004) and the Fregoni index (FI) (Fregoni, 2003) count the occurrences of low temperature periods before harvest, which are important for wine composition (Kliewer, 1973b; Kliewer & Torres, 1972). CI corresponds to mean September daily minimum temperature (Tmin). FI is defined as daily Tmax minus daily Tmin, summed over all days in September and then multiplied by the number of days in September with Tmean below 10°C. The dryness index (DI) calculates a water balance, considering the water reserve at the beginning of the ripening period, incoming water and outgoing water.

Table 2.1. Bioclimatic indices, the corresponding equations for the Northern Hemisphere, and literature sources, adapted from Jones et al. (2005), Blanco-Ward, Queijeiro and Jones (2007), and OIV (2012)

Index name and abbreviation	Equation	Period	Source
Winkler index (WI)	$\sum(T_{\text{mean}} - 10)$	1 Apr. to 31 Oct.	Amerine and Winkler (1944)
Huglin's heliothermal index (HI)	$k * \sum \left(\frac{T_{\text{mean}} + T_{\text{max}}}{2} - 10 \right)$	1 Apr. to 30 Sep.	Huglin (1978)
Branas index (BHI)	$\sum(T_{\text{mean}} - 10) * \sum(I_e * 10^{-6})$	1 Apr. to 31 Oct.	Branas (1974)
Biologically effective degree days (BEDD)	$\sum \min\{\max[T_{\text{mean}} - 10; 0]; 9\}$	1 Apr. to 31 Oct.	Gladstones (1992)
Sum of average temperature (SAT)	$\sum(T_{\text{mean}} > 10)$	1 Apr. to 31 Oct.	Jones and Davis (2000)
Growing season temperature average (GST)	$\text{Avg}(T_{\text{mean}})$	1 Apr. to 31 Oct.	Jones et al. (2005)
Cool night index (CI)	$\text{Avg}(T_{\text{min}})$	September	Tonietto and Carbonneau (2004)
Fregoni index (FI)	$\sum(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) * \sum N_d T < 10$	September	OIV (2012)
Dryness index (DI)	$\sum W_o + P - T_v - E_s$	1 Apr. to 30 Sep.	Riou et al. (1994)

T_{max} is daily maximum temperature, T_{min} is daily minimum temperature, and T_{mean} is daily mean temperature $((T_{\text{max}}+T_{\text{min}})/2)$. k is a constant depending on latitude (40° to 50°) spanning from 1.02 to 1.06; I_e is effective insolation; d is the number of hours per day where $T < 10^\circ\text{C}$; W_o is the water reserve at the beginning of the period; P is monthly precipitation; T_v is monthly vine transpiration; E_s is monthly soil evaporation.

In this study, we assessed trends in relevant bioclimatic indices for Neuchatel (Switzerland) vineyards, considering two grape varieties and trends in climate parameters since 1900. We focused on the trends in GST, HI, and CI, taking the period prior to harvest into account, and investigated their consequences for two grape varieties (Pinot Noir and Merlot). Understanding these trends will help to predict future short-term prospects for the vineyards.

2.2. Materials and Methods

2.2.1. Study area

The vineyards of Neuchatel, Switzerland, are located to the south-south-east of the Jura foothills (Figure 2.1.). The vineyards are located on the shores of Lake Neuchatel and Lake Biel, between 430 and 550 m a.s.l. Although Chasselas was historically the main grape variety cultivated in this region, it was gradually replaced by other varieties, mainly Pinot Noir. Vineyards currently cover approximately 600 ha and produce mostly Pinot Noir (55%) and Chasselas (27%), but also other varieties such as Pinot Gris (<4%), Chardonnay (<4%), Merlot (<1%), Cabernet Franc (<0.5%), Divico (<0.5%), Galotta (<0.5%) and Malbec (<0.5%) (Cartillier, 2018). The grapevines are mainly planted on a south-south-east-facing slope, although some vineyards exist on flat land by the lakes. According to Köppen's climate classification adapted by Peel et al. (2007), the region is characterized by a temperate and humid continental

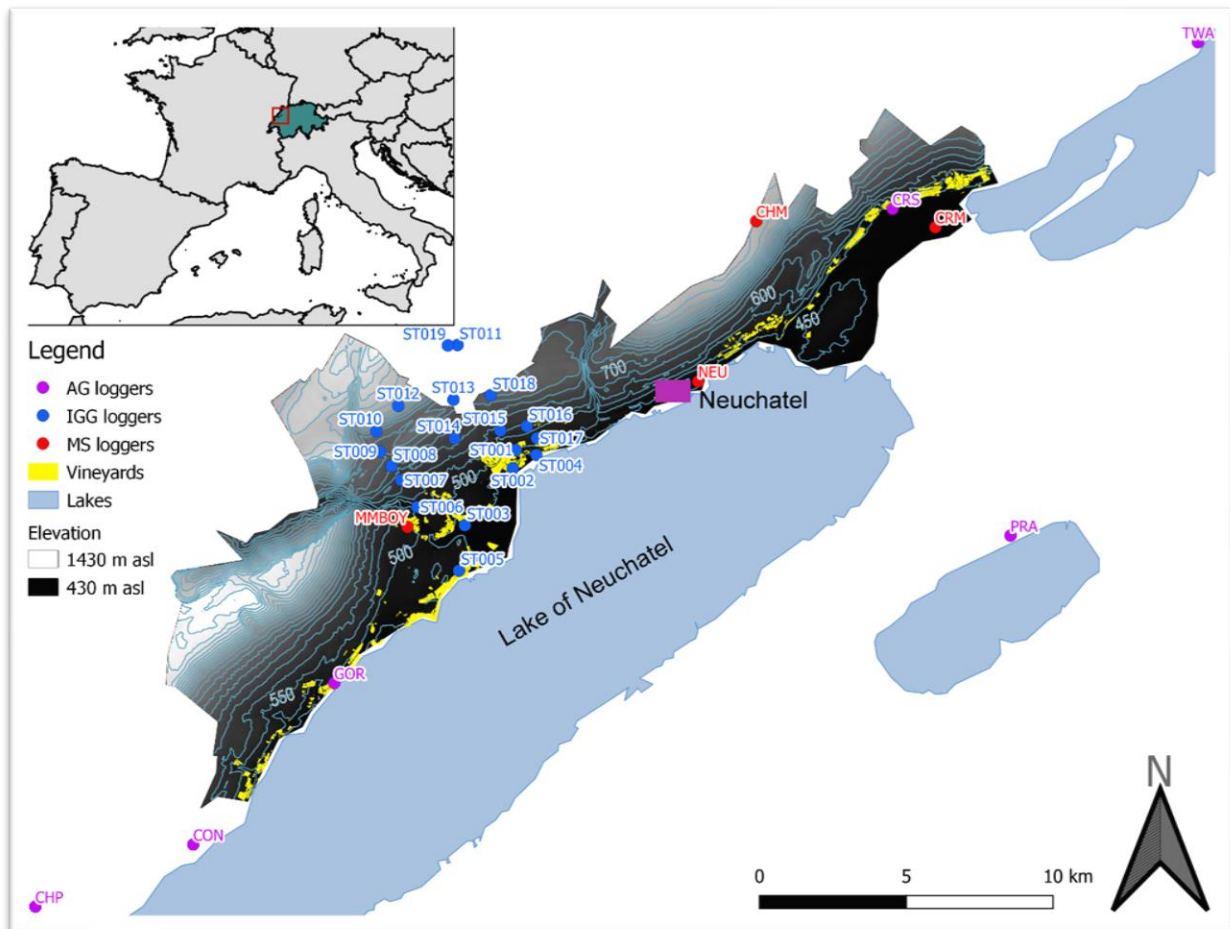


Figure 2.1. Location of the study area, vineyards and temperature loggers. AG loggers are temperature loggers from Agrometeo, IGG loggers are loggers from the Geography department of the University of Neuchatel, and MS loggers are loggers from MeteoSwiss.

climate. Its grapevine climate is considered cool according to Jones' classification (Jones, 2006).

2.2.2. Data

We used daily air temperature minima (Tmin) and maxima (Tmax) data to compute and analyze various bioclimatic indices. These data originated from 29 temperature loggers, provided by three sources: our own loggers (19), Agrometeo (6) (<http://www.agrometeo.ch/fr/meteorology/datas>) and MeteoSwiss (4) (<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/>). All loggers record air temperature at 2 m above ground. Our own loggers (Figure 2.1: IGG loggers) were installed in 2017. They are located in and above the vineyards in order to collect precise, local data (Figure 2.1 and Table 2.3). The other stations are representative of the topographic and elevational situation of Neuchatel's vineyards. All of them are located in the vineyards or slightly higher in similar geographical conditions. MeteoSwiss Neuchatel (NEU) is our main meteorological long-term reference station, with temperature data available since 1864. Four Agrometeo stations (AG loggers) are located outside the study area, in nearby south-south-east-facing slopes and lakeshores in wine-growing areas with similar topographic and climatic conditions. The CRM and CHM MeteoSwiss stations (Figure 2.1) are not representative of the geographical situation of the vineyards. The CRM station is located on a valley floor near a small river. It is therefore exposed to cold air pools and a high spring frost risk. Consequently, vines are not cultivated in this area (Figure 2.1). The CHM station is on a mountain peak at 1136 m a.s.l. These two stations provide a comparison between the vineyard climate and microclimates that are colder because of elevation or topography. We used homogeneous data series starting in 1900 to compute the average trend in Switzerland mean growing season temperature (GST) in order to make comparisons between the study region and the average of 14 MeteoSwiss representative stations in Switzerland. However, at two stations data were only available starting in 1964 (PAY) or 1879 (CHD) rather than 1864.

We used the standard WMO (World Meteorological Organization) method to compute daily mean temperature at each station:

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Harvest dates were recorded from 1970 to 2017 by the *Station viticole cantonale* of Neuchatel, which did not record dates in 2018 and 2019. For these two years harvest dates were estimated using our own phenological observations. Harvest dates correspond to the average date of the beginning of the harvest period in Neuchatel's vineyards each year, based on Chasselas and Pinot Noir. Chasselas is normally harvested a few days later than Pinot Noir.

2.2.3. Methods

We chose Huglin's heliothermal index (HI) as the reference bioclimatic index rather than other indices based on the accumulation of growing degree days (GDDs), as it appeared to show the highest correlation with sugar content at harvest (Huglin, 1978). There were many missing values (NA) at some Agrometeo stations, which made it difficult to compute HI (Table 2.3). Therefore, we replaced all NA values with predicted values using a lapse rate model. Elevation is known to be the main factor explaining air temperature differences at the regional scale (Joly et al., 2012). We used all stations for which we had data from 2007 or earlier to determine a mean lapse rate per month based on 13 years of daily mean and maximum temperatures. We crossed all measured daily temperature data with predicted data for all stations to check the quality of the model. It gave good results for both T_{mean} ($R^2=0.98$ and $p<0.001$) and T_{max} ($R^2=0.97$ and $p<0.001$) [Figure 2.7]. The model made it possible to replace 1385 (out of 74'900) missing values with predicted values. This model was also applied to estimate past climatic conditions and produce a map indicating past HI values in the study area.

We used homogenized temperature data from the MeteoSwiss NEU station to compute trends in all bioclimatic indices (GST, HI, CI and 'prior to harvest cool night index' [PHCI; described below]), as these data had already been homogenized for our study period. This station is located at 485 m a.s.l., which is approximatively the average of the vineyards' elevation range (430 to 550 m a.s.l.). This station thus offers a representation of the mean

climate in our vineyard study area. The other stations were used to produce high-precision climatic maps by considering their lapse rate.

We first focused on the trends in GST. This bioclimatic index is currently used to define the suitability of climatic conditions for the growth of specific grape varieties (Jones et al., 2005). Second, we analyzed the trends in HI. We produced high-resolution maps illustrating the elevational variability of this index and the interannual variability characterizing these vineyards. We used Pinot Noir and Merlot optimum estimations based on Huglin and Schneider (1998) to illustrate vine culture optimal conditions based on climatic parameters. These optima represent climate conditions under which grapes contain 180–200g/l of sugar (Huglin & Schneider, 1998). These optima are not applied strictly because sugar content depends on other factors as well, such as yield and irrigation system (Huglin & Schneider, 1998). We analyzed trends in CI as the third bioclimatic index. Finally, we computed a new index based on the dates of the harvest period (prior to harvest cool night index; PHCI). Indeed, as the cool night index is based on September temperatures, it does not always fit with the current harvest period. Our new index is computed using the mean daily Tmin during the 30 days prior to harvest. This index has the advantage of taking into consideration changes in harvest dates and actual Tmin values that grapes experience prior to harvest. Both CI and PHCI were used to determine the occurrence of cool night periods, which are important for wine composition (Nicholas et al., 2011).

Prior to harvest cool night index (PHCI) = $\frac{1}{30} \sum_{Hd-30}^{Hd} Tmin$; where Hd = annual average date of the harvest period.

We used the program R to compute all statistical tests (Team, 2013) .

2.3. Results

2.3.1. Trends in average growing season temperature (GST) since 1900

The growing season temperature average according to Jones et al. (2005) refers to the average daily Tmean from 1 April to 31 October (Table 2.1). The trends since 1900 in GST on average across Switzerland (a) and for the station NEU (b) are shown in Figure 2.2. We used the 14 MeteoSwiss reference stations to compute the Swiss average. Two segmented regressions produced two breaking points and three periods for both Switzerland and NEU.

For Switzerland, the first period (1900 to 1947) was characterized by an increase of $0.23^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ ($p < 0.001$), the second period (1947 to 1974) by a decrease of $0.16^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ ($p < 0.01$), and the third period (1974 to 2019) by an increase of $0.57^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ ($p < 0.001$; Figure 2b). For NEU, the segmented regression indicated the same three periods, but only two of them showed a significant change in GST: the first one (1900 to 1947) with an increase of $0.25^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ and the third one (1974 to 2019) with an increase of $0.55^{\circ}\text{C decade}^{-1}$, both highly significant ($p < 0.001$). The second interval (1941 to 1973) showed a slight decrease of $0.23^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ (not significant; $p = 0.063$).

The 11-year moving average (MovAve) confirmed this general trend in GST, with a clear increase only since the 1970s for both Switzerland and NEU (Figure 2.2). A linear model was computed, showing a trend from 1974 to 2019. 1974 corresponded to the second breaking point produced by the segmented regression. The linear model showed trends similar to those in the third part of the segmented regression for both Switzerland, with an increase of $0.59 \pm 0.06^{\circ}\text{C per decade}$ ($p < 0.001$ and $R^2 = 0.72$), and the NEU station, with an increase of $0.56 \pm 0.06^{\circ}\text{C per decade}$ ($p < 0.001$ and $R^2 = 0.65$). Predictive intervals at 90% and 95% (PI.90 and PI.95) show the interannual variability of both Switzerland and NEU (Figure 2).

According to Jones' classification (Jones, 2006), the climate in the region of Neuchatel was cool during the 1970s. The average GST was 14.2°C . The predictive interval (PI.90) during that decade ranged from 13.2°C to 15.2°C . Following the increase in GST over the period 1974 to 2019, the climate was labeled intermediate during the 2010s. The average GST was 16.3°C and the predictive interval (PI.90) was between 15.3°C and 17.3°C during the period 2010–2019. Figure 2.2 shows that Neuchatel experienced trends in GST and in PI similar to those of the Swiss average.

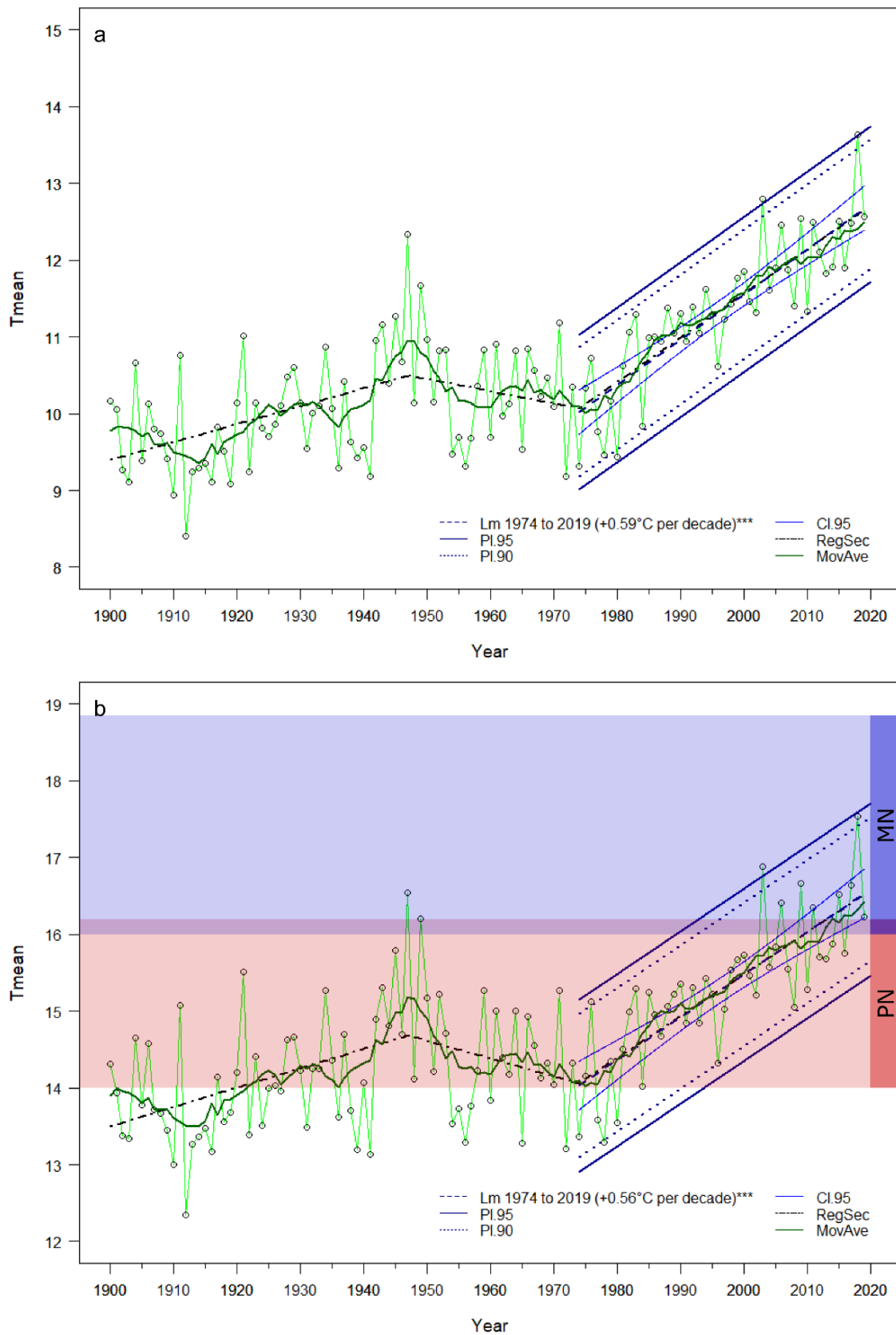


Figure 2.2. Trends in the growing season temperature (GST) averages in Switzerland (a) and at the NEU station (b) from 1900 to 2019. The PN red band and MN blue band in (b) indicate the GST suitability for Pinot Noir and Merlot, respectively, with a ± 0.2 – 0.5°C error margin,

based on GST according to Jones (2006). Lm 1974 to 2019 is the linear model, '***' indicates that $p < 0.001$. The two curved blue lines around the linear model indicate the confidence interval. They show the mean standard error of this model, which corresponds to the year-over-year variability of the index in the region. This interannual variability is represented in the graph by two predictive intervals, with 90% of the points inside for the first one (PI.90; dotted dark blue lines) and 95% inside for the second one (PI.95; solid dark blue lines). They indicate that HI was located between these lines 9 years out of 10 for PI.90 and 19 years out of 20 for PI.95. The black dotted lines show the sequential regression. The dark green line shows the 11-year moving average (MovAve).

2.3.2. Huglin's heliothermal index: trends, maps and variability

The trend since 1900 in Huglin's heliothermal index (HI; Huglin & Schneider, 1998) for the station NEU is shown in Figure 2.3. The computed segmented regression indicated three periods, all of them showing significant changes in HI: the first one (1900 to 1949) was characterized by an increase of 39.4 ± 14.7 per decade ($p < 0.001$) and the third one (1972 to 2019) by an increase of 103.7 ± 15.1 per decade ($p < 0.001$). During the period from 1950 to 1971, this index decreased slightly by 77 ± 47.2 ($p < 0.05$).

The 11-year moving average (MovAve) showed a similar general behavior. A linear model was computed, producing a mean trend from 1972 to 2019. It differed least from the third part of the segmented regression, as it increased by 111 ± 14.6 per decade ($p < 0.001$ and $R^2 = 0.55$). Figure 2.3 shows that the mean HI in Neuchatel vineyards presently lies between the theoretical optimum for Pinot Noir and for Merlot.

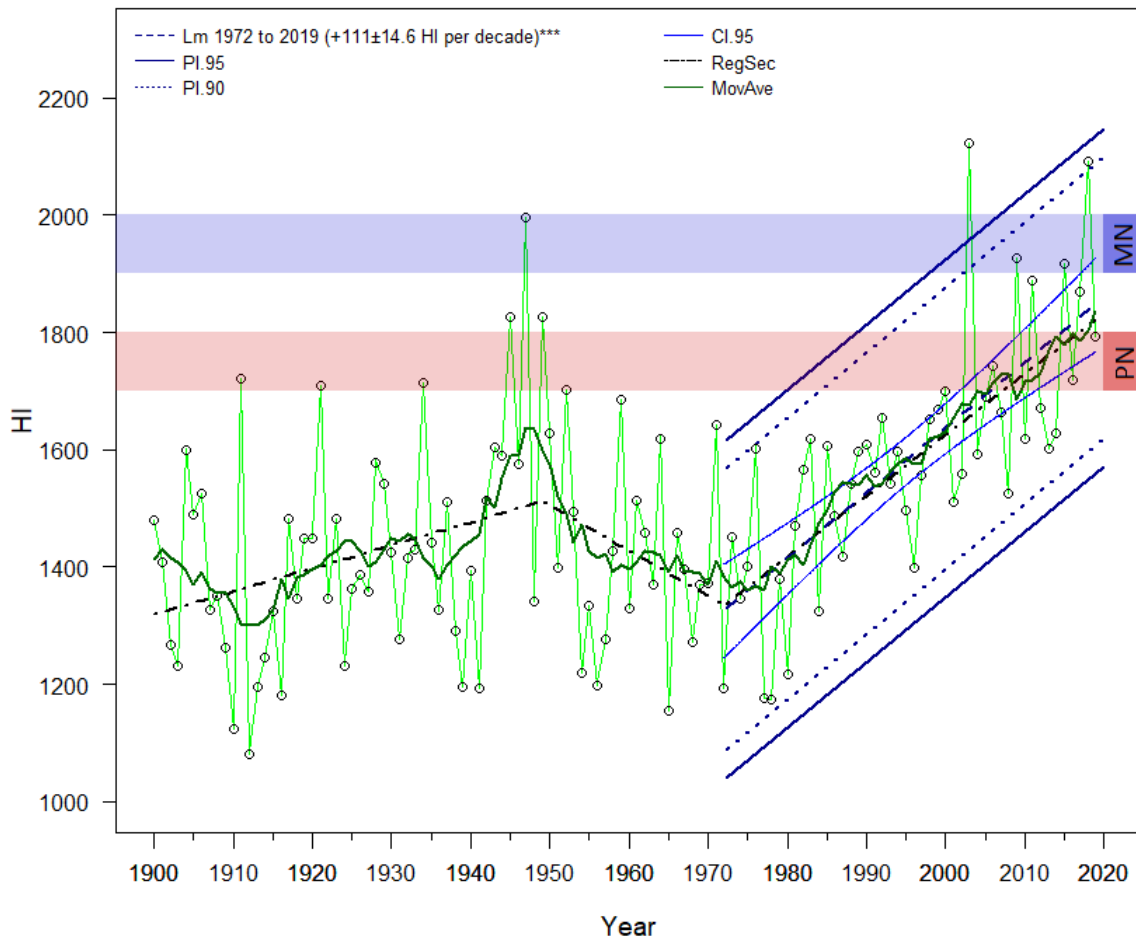


Figure 2.3. Trends in Huglin's heliothermal index (HI) for the NEU station (485 m a.s.l.) from 1900 to 2019. Lm 1972 to 2019 is the linear model, '***' indicates that $p < 0.001$. The two curved blue lines around the linear model indicate the confidence interval. They show the mean standard error of this model, which corresponds to the year-over-year variability of the index in the region. This interannual variability is represented in the graph by two predictive intervals, with 90% of the points inside for the first one (PI.90; dotted dark blue lines) and 95% inside for the second one (PI.95; solid dark blue lines). They indicate that HI was located between these lines 9 years out of 10 for PI.90 and 19 years out of 20 for PI.95. They differ from the average by approximately ± 200 (PI.90) and ± 250 (PI.95) in extreme years. The PN red band and MN blue band indicate the optimum HI for Pinot Noir and Merlot, respectively. The black dotted lines show the sequential regression. The dark green line shows the 11-year moving average (MovAve).

The maps in Figure 2.4 make it possible to compare HI in our study region between two periods, the 1970s (Figure 2.4a) and the 2010s (Figure 2.4b).

Figure 4 shows that the grapevine climate based on the HI classification has changed during the study period. In the 1970s mean HI values reached between 1300 and 1500 in our study region. These values correspond to the minimum theoretical limit for vine growth (Huglin & Schneider, 1998). The vineyards' climate during that period could be considered very cool. In 40 years, the HI values have increased by approximately 400 (Figures 3 and 4). On average, the vineyards now belong to the temperate climate classification. According to this bioclimatic index, the Neuchatel vineyards should therefore be gradually adapted, with more thermophilic varieties such as Merlot or Malbec planted at lower elevations. The HI values observed at lower elevations during the 1970s were measured approximately 300 m higher in the 2010s, between 700 and 800 m a.s.l.

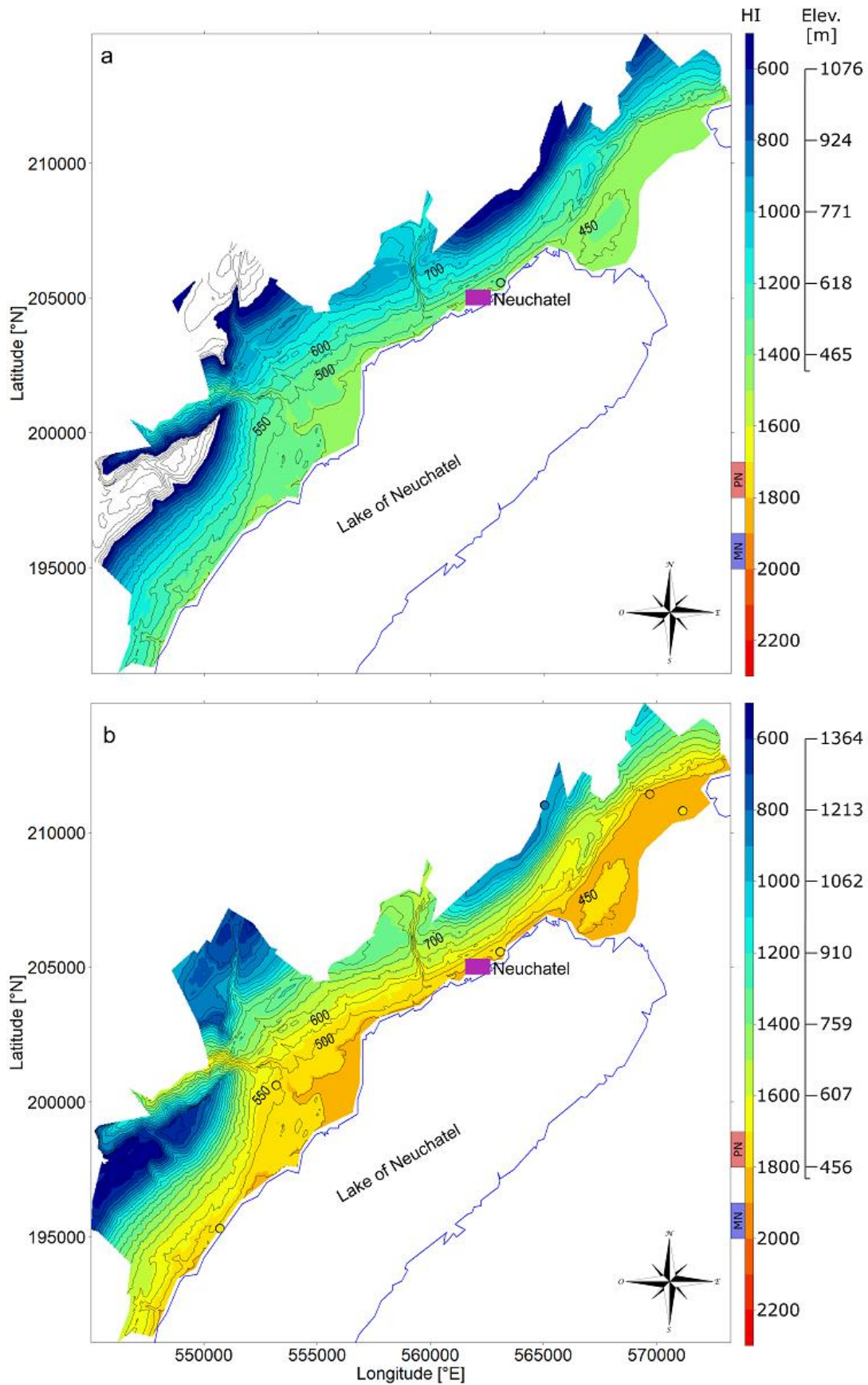


Figure 2.4. Mean Huglin's heliothermal index (HI) in the study region during the periods 1970–1979 (a) and 2010–2019 (b). The four temperature loggers (4b) are represented by circles

(only NEU station was available for 4a). The represented values correspond to the mean HI values over each period. The isolines represent 50 m elevation classes, ranging from 430 m to more than 1000 m a.s.l. The color gradients indicate changes in HI in increments of 100. Points show values measured by temperature loggers. PN (red) and MN (blue) bands indicate the optimum HI for Pinot Noir and Merlot, respectively.

Interannual temperature variability has always been high in our study region. For the growing season, this variability did not change significantly with increasing temperatures during the 20th century (Luterbacher et al., 2004; Rebetez, 2001). Our results indicate that the interannual variability in HI has not changed significantly either, in spite of increasing temperatures (Table 2.2). These values are highly determined by temperatures during the growing season. The variances of the periods 1970–1979 (27059.72) and 2010–2019 (25841.55) are quite similar. Note that the variance was very low during the decade 1990–1999. The interquartile ranges are also quite similar except for 1990–1999 and 2010–2019 (Table 2.2). Our results for PI.95 (Figure 2.3), which are based on 50 years, show that HI varied by approximately ± 250 compared with the average for an especially cold or warm year.

Table 2.2. Average value of Huglin’s heliothermal index (HI), variance (Var), standard deviation (Sd) and interquartile range (IQR) of each decade since 1970 for the NEU station.

Decade	Average HI	Var	Sd	IQR
1970–1979	1374.1	27059.7	164.5	207.9
1980–1989	1484.6	17457.9	132.1	159.2
1990–1999	1573.8	6876.2	82.9	95.4
2000–2010	1703.7	36922.3	192.2	165.9
2010–2019	1779.8	25841.6	160.8	245.7

As an illustration of the geographical consequences of this interannual variability during the last decade, the maps in Figure 2.5 represent the conditions in two contrasting years. The year 2014 (Figure 2.5a) was characterized by a colder and wetter growing season than on average during the last decade, and HI ranged from just below 1700 (lakeside) to 1500 (580 m a.s.l.). This year was clearly below the optimum HI for Merlot and also for Pinot Noir in a few vineyards. Although 2013 was even colder, we decided to analyze 2014 because a hail event destroyed most of the harvest in 2013. In contrast, 2018 (Figure 2.5b) was characterized by a warm and dry growing season, with the second highest (after 2003) HI since 1900, with values ranging from 2200 by the lakeside (430 m a.s.l.) to 2000 at the highest vineyards’ elevation (580 m a.s.l.). The year 2018 was outside of the predictive interval (PI.90) shown in Figure 2.3. This year clearly had HI values above the optimum for Pinot Noir, and a few values

even exceeded the optimum for Merlot. We asked the two producers of Merlot in 2014 to note the two vintages. They reported on average 11.5/20 for 2014 and 17/20 for 2018.

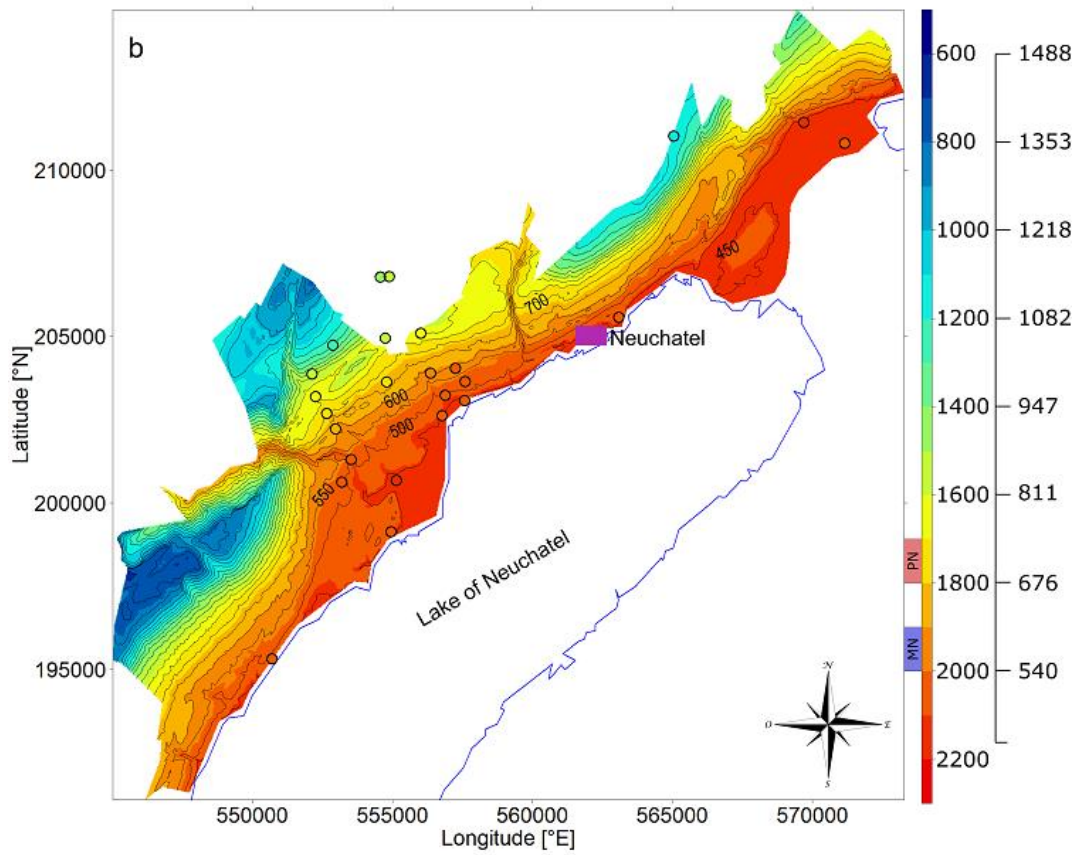
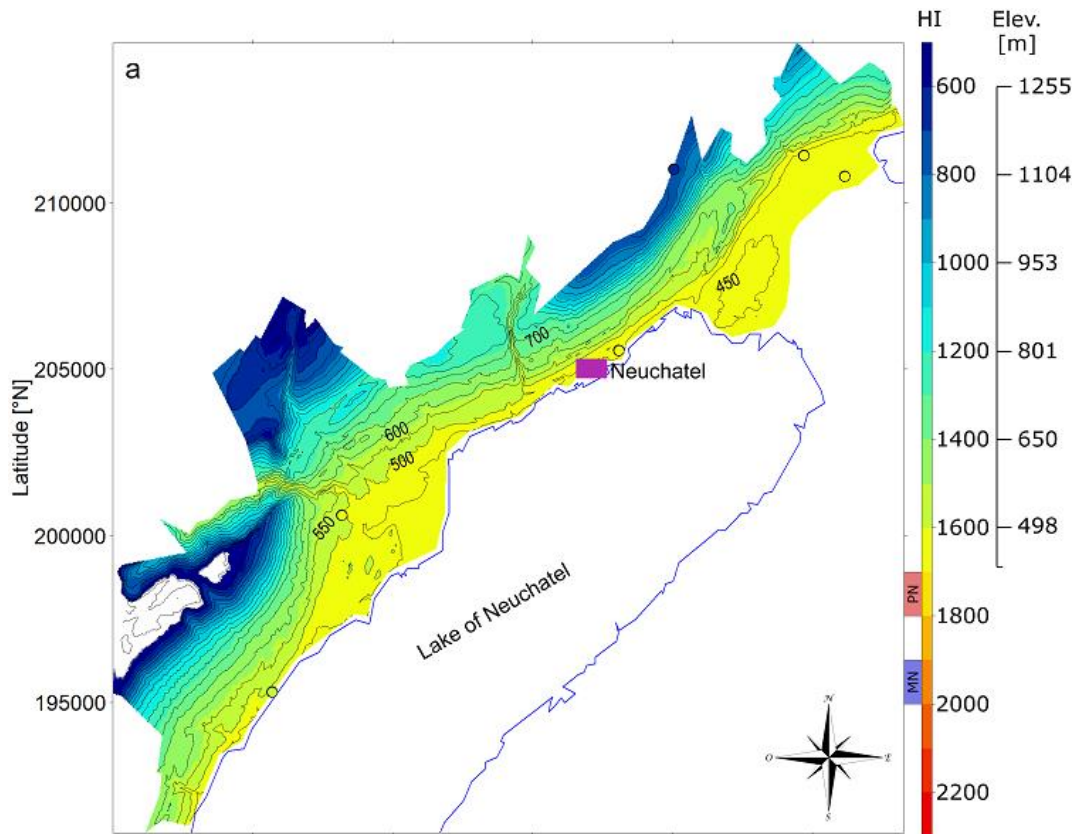


Figure 2.5. Huglin's heliothermal index (HI) in the region of Neuchatel during a cold year (2014, a) and a warm year (2018, b). The 6 and the 25 temperature loggers with data available in 2014 and 2018, respectively, are represented by circles.

The results show earlier harvest dates, with a trend of -4.18 ± 0.79 days decade⁻¹ (Figure 2.6a). The cool night index (CI) was computed according to Tonietto and Carbonneau (2004). It has increased by 0.33 ± 0.13 °C per decade since the 1970s, with $p < 0.05$ and $R^2 = 0.1$ according to a linear model (Figure 2.6b). The linear model for PHCI showed an increase of 0.95 ± 0.16 °C per decade, with $p < 0.001$ and $R^2 = 0.39$. Note that PHCI was generally lower than CI until 1996 but has been increasing faster and has been mostly higher than CI since the beginning of the 21st century (Figure 2.6b).

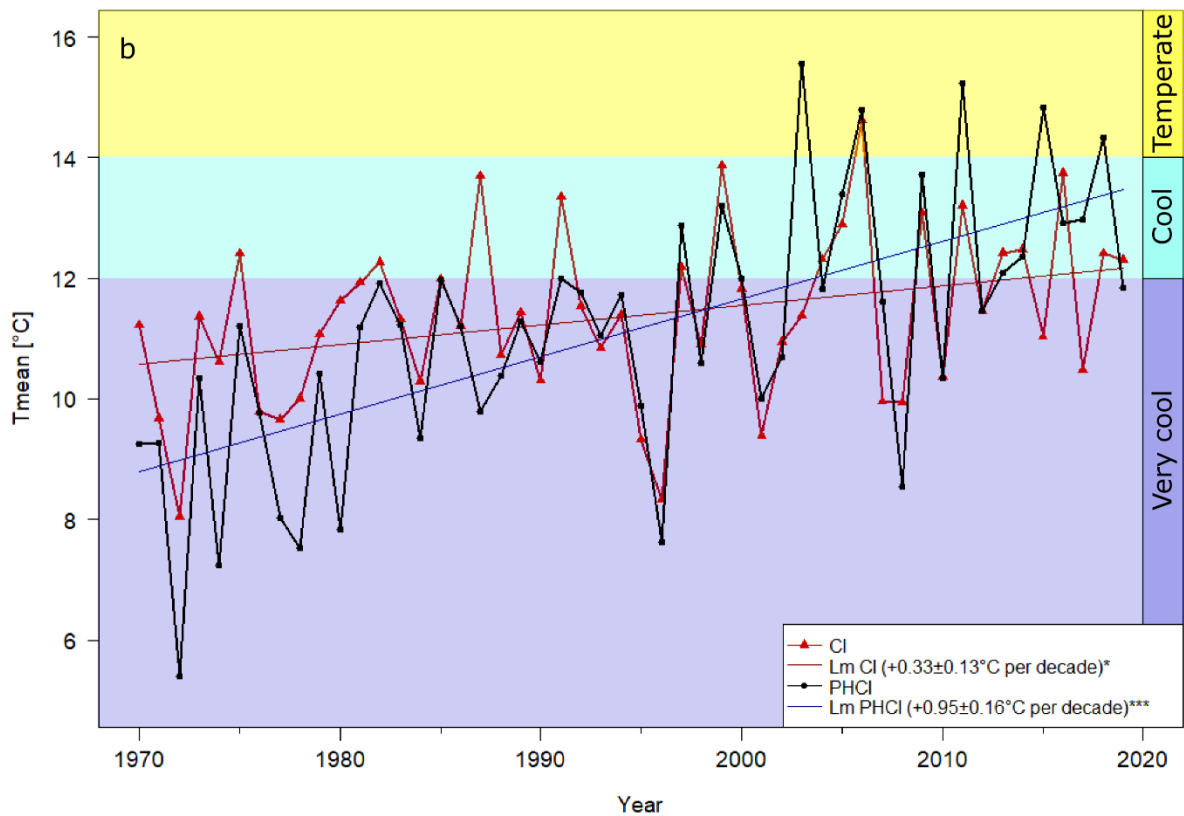
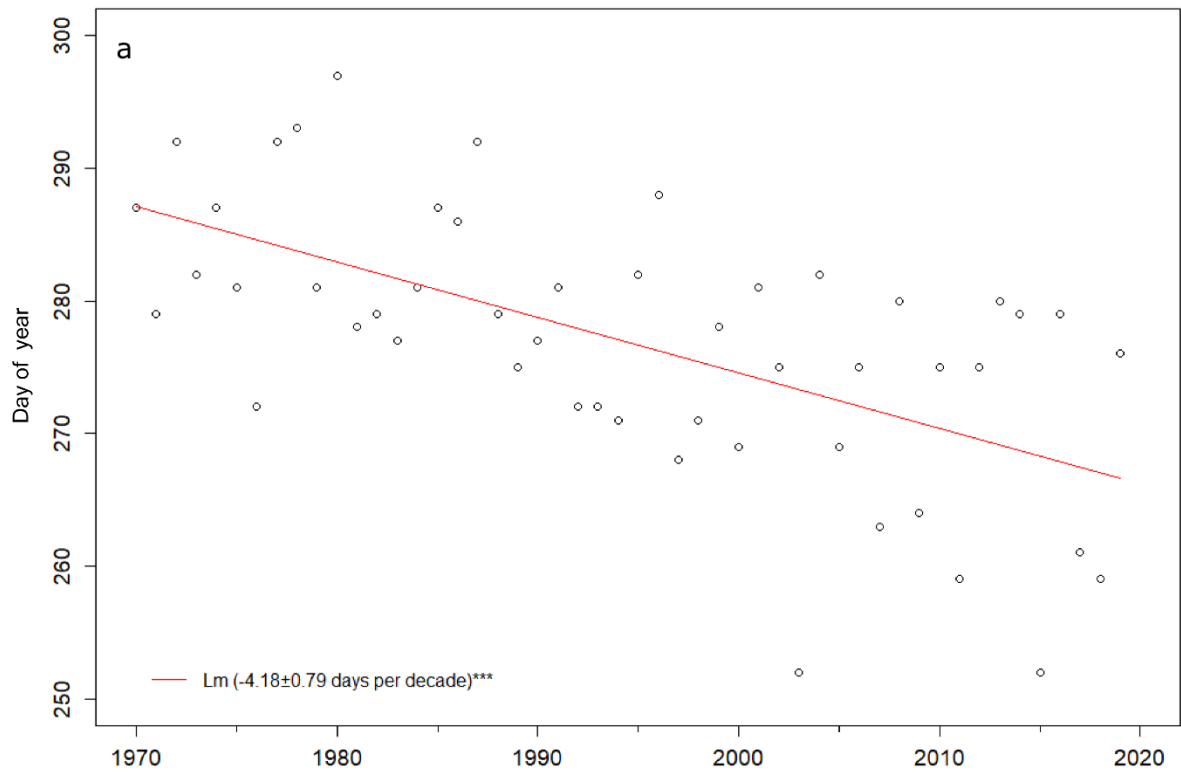


Figure 2.6. Average first day of harvest (a) and trends in cool night index (CI) and prior to harvest cool night index (PHCI; b) since 1970 at the NEU station.

2.4. Discussion

The trends in bioclimatic indices for Neuchatel vineyards indicate a need for specific adaptation strategies in the future. Some studies, e.g. Santos et al. (2020) and Parker et al. (2020) already highlighted that European vineyards will face an increase in air temperature associated with an advance in phenological stage of vine during the next decades, due to global warming. This could lead to a latitudinal shift in grape varieties. According to Morales-Castilla et al. (2020), southern Europe vineyards will decline while new vineyards could appear in northern Europe. In cool climate regions like Neuchatel, the vineyards will probably have to adapt by changing part of the cultivated varieties. This was also suggested by Molitor and Junk (2019) concerning Luxembourg vineyards. Wolkovitch et al. (2018) highlighted that, due to the important increase in temperature expected for the next decades in Europe, adaptation strategies like the introduction of new varieties should already be considered in the vineyards of western Europe. Consequently, a change in cultivated varieties, for example growing Merlot instead of Pinot noir along the lake, could now become an adaptation strategy for Neuchatel. Our results suggest that our study region now offers favorable temperature conditions for Merlot. They offer contrasting perspectives for viticulture suitability concerning the production of high-quality Pinot Noir and Merlot wines: trends in HI and GST suggest that the vineyards' climate will soon become too warm for Pinot Noir most of the time but suitable for Merlot more frequently. Concerning Pinot Noir in this region, our results show that it would make sense to investigate potential new areas for vineyards at higher elevations. If soils are properly adapted, Pinot Noir cultivation could be considered above 550 m a.s.l., which is the present regional official and legal upper limit for vineyards.

The present average HI in our study region lies between the theoretical optimum for Pinot Noir and for Merlot. As HI is based on daily mean and daily maximum air temperatures, it has been increasing in line with global warming and the approximately twice faster warming observed in Switzerland (Pachauri et al., 2014b; Rebetez & Reinhard, 2008). Our analyses of HI, showing an increase of 111 ± 14.6 per decade, indicate a recent change in grapevine climate type category: the theoretical optimum was favorable for Pinot Noir until the first decade of the 21st century and was between the optimum for Pinot Noir and for Merlot during the second decade. The predictive interval in HI of approximately ± 250 between extreme years, such as 2018 (hot and dry) and 2014 (cold and rainy) shows important differences from year

to year compared with the average decadal situation in terms of the conditions for vine cultivation. Descriptive statistics of each decade show quite similar variances and IQRs (interquartile ranges) for each decade except 1990–1999, which had less variability for these parameters (Table 2.2). The data distribution (Figure 2.3) close to the average trend for all the years in this decade and the absence of an extreme year could explain this particularity. The presence in a decade of one or more extreme years that are much warmer (1971, 2003 and 2018) and/or much cooler (1977 and 1978) than the average should logically inflate the variance and IQR. Whatever the average values, winegrowers must adapt to high interannual variability.

The prior to harvest cool night index (PHCI) increased three times faster than the cool night index (CI) during the period 1970–2019. This is connected to the fact that the harvests usually took place in mid-October in the 1970s compared with mid- or end of September more recently (Figure 2.6a). The upward trend in CI refers to the rather slow (compared with other months and with Tmax) Tmin increase in September ($0.33 \pm 13^\circ\text{C decade}^{-1}$). According to the classification for CI by Tonietto and Carbonneau (2004), the quality of Pinot Noir benefited from very cool night temperatures ($<12^\circ\text{C}$) in the past compared with recent cool temperature values ($12\text{--}14^\circ\text{C}$). PHCI analyses allowed us to consider the effective minimum temperature values before harvest, known to be determinant for wines' aromas and color (Kliewer, 1973a; Kliewer & Torres, 1972; Moriondo et al., 2013). As harvests occur earlier, PHCI quantifies the occurrence of cool nights before the harvest, unlike CI. Our results for PHCI trend analyses indicate that, assuming a continuing similar temperature increase during the next 5–10 years, the average daily minimum temperature prior to the harvest period can be expected to exceed 14°C . Such values are likely to impact the typicity and composition of Pinot Noir. Trends in GST are quite similar between Neuchatel and the Swiss average. Consequently, other Swiss wine regions can be expected to have similar adaptation needs.

All proposed climatic scenarios indicate that temperature will continue to increase in the Neuchatel region during the next decades (Crocchi-Maspoli et al., 2018). Our results show that producing meridional varieties, such as Merlot, could become an adaptation strategy in Neuchatel vineyards at lower elevations. However, the success of such a strategy will depend on local and regional consumers' interest in these varieties, as the Neuchatel wine is sold almost exclusively in Switzerland (FOAG, 2016).

Our study is based on temperature data only. Other climatic and non-climatic factors

are also important for vine cultivation, although average temperature is clearly the main driver. Further studies should investigate other climatic factors, such as heat events and spring frost. Concerning the latter, the rather late budburst of Merlot compared with Pinot Noir corresponds to a lower spring frost risk. Climatic scenarios could give a better idea of the future conditions in Neuchatel vineyards. They could also provide indications of potential risks due to climate change.

Wine growers have to deal with multiple parameters, and the choice of grape variety cannot be based on climatic considerations only. Our results do not take into account the specific adaptive capacities of the plant, changes in consumers' tastes, or the cultivation practices used by winegrowers (van Leeuwen et al., 2013). For example, some wine regions actually exceed the limits in terms of the mean temperature characteristics of the grape varieties they produce, without big impacts on the quality of their wines (van Leeuwen et al., 2013).

2.5. Conclusions

Our analysis of three bioclimatic indices show important trends since the 1970s in the region of Neuchatel. We found an increase in GST by 0.56°C per decade since the 1970s. If the GST trend continues, the probability of having a year with a GST under 16°C will be lower than 10% within 10 years. Considering GST as an indicator for grape variety suitability, the climate of the Neuchatel region will become suitable for Merlot in the next decades. This trend also implies that adaptation strategies are needed for Pinot Noir. In 2018, GST was already too high for this variety, and it is likely that this situation will happen again during the next decades.

HI increased by more than 400 units during the study period. Consequently, according to this index the Neuchatel vineyard climate passed from very cool to temperate during the last decades. Our results suggest potential future sugar content problems for Pinot Noir winemaking in this region.

Our results show that our new index, PHCI, is better suited than CI to characterize climate change impacts on vine growth and wine production in the context of climate change. Considering the low and non-significant increase in September temperatures, as well as the trend toward earlier harvests, CI no longer characterizes the real situation of cool nights during the period prior to harvest, even though it is a useful and easy tool for interannual and inter-

regional comparisons. The increase in PHCI by 0.97°C per decade shows that the Neuchatel wine country will now mostly face temperate night conditions before harvest.

The four bioclimatic indices applied in the present study show that the considered region will soon face problems in the cultivation of Pinot Noir. A possible solution would be an upward elevational shift of vineyards. The climate of the region has changed rapidly in the last years and has become favorable for more thermophilic varieties at lower elevations. Our results highlight the urgent need for adaptation strategies for viticulture under global warming. In this context, it is crucial to conduct local climatic analyses in all winegrowing regions in order to develop adaptation strategies based on their results.

Declaration

Funding

This research paper has been funded by the project D.01 of the pilot program “adaptation to climate change” of the Federal Office for the Environment. It includes the financial participation of the Swiss Confederation, of the Canton of Neuchatel, of winegrowing localities and of winegrowing associations.

Conflicts of interest/Competing interests

No conflict of interest exists for this paper.

Ethics approval

No ethical issues are involved in this paper.

Consent to participate

The authors gave their consent to participate.

Consent for publication

The authors gave their consent for publication.

Authors Contributions

VC and MR designed the research and the paper. VC developed the R-codes, carried out the statistical analyses, wrote the main part of the paper and produced the map, tables and figures. LS wrote part of the text and of the R codes. PC contributed to the analyses and wrote part of the text. MR wrote part of the text and guided the research and writing process.

Availability of data and material

The data availability from MeteoSwiss and Agrometeo is indicated in the data section of the paper. The data availability from our loggers can be asked to the corresponding author.

Code availability

The R code used for the Results section can be asked to the corresponding author.

References

- Amerine M, Winkler A (1944) Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia* 15:493-675
- Battaglini A, Barbeau G, Bindi M, Badeck F-W (2009) European winegrowers' perceptions of

- climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change* 9:61-73. <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0053-9>
- Boudon-Padieu E, Maixner M (2007) Potential effects of climate change on distribution and activity of insect vectors of grapevine pathogens. In: *Colloque international et pluridisciplinaire sous l'égide de la chaire UNESCO Vin et Culture*, Dijon, 2007.
- Boyer J (2016) L'implication des acteurs de la recherche dans les processus d'adaptation au changement climatique: l'exemple des régions viticoles françaises. *Innovations*:147-171. <https://doi.org/10.3917/inno.051.0147>
- Branas J (1974) *Viticulture*. Dehan, Montpellier, France
- Briche E, Beltrando G, Somot S, Quenol H (2014) Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region. *Climatic Change* 123:241-254. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1044-5>
- Cartillier S (2018) *Année viticole 2017*. Station viticole cantonale de Neuchâtel, Neuchâtel.
- Cook BI, Wolkovich EM (2016) Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *Nature Climate Change* 6:715-721. <https://doi.org/10.1038/nclimate2960>
- Croci-Maspoli M et al. (2018) *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland - Technical Report*. National Centre for Climate Services, Zurich
- Cuccia C, Richard Y, Bois B, Castel T, Thevenin D *Changement climatique : impacts sur la phénologie du Pinot Noir en Bourgogne*. In: *23ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, France, 2010-09-01 2010. Association Internationale de Climatologie, pp 143-148
- De Orduna RM (2010) Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International* 43:1844-1855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
- Dequin S, Escudier J-L, Bely M, Noble J, Albertin W, Masneuf-Pomarède I, Marullo P, Salmon J-M, Sablayrolles JM (2017) How to adapt winemaking practices to modified grape composition under climate change conditions. *OENO One* 51:205-214. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1584>
- Duchêne E, Schneider C (2005) Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development* 25:93-99. <https://doi.org/10.1051/agro:2004057>
- FOAG (2016) *Rapport sur le système de contrôle des vins : Contrôles de la vendange et du commerce des vins*. Confederation of Switzerland, Switzerland
- Fraga H, Santos JA, Moutinho-Pereira J, Carlos C, Silvestre J, Eiras-Dias J, Mota T, Malheiro AC (2016) Statistical modelling of grapevine phenology in Portuguese wine regions: observed trends and climate change projections. *The Journal of Agricultural Science* 154:795-811. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000933>
- Fregoni M (2003) L'indice bioclimatico di qualità Fregoni. In: Fregoni M, Schuster D, Paoletti A (eds) *Terroir, Zonazione, Viticoltura : Tratto internazionale*. Phytoline, Rivoli, Italy, pp 115-127
- Gladstones J (1992) *Viticulture and environment*. Winetitles, Adelaide, Australia
- Huglin P (1978) Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *C R Acad Agric*:1117-1126
- Huglin P, Schneider C (1998) *Biologie et écologie de la vigne*. 2nd edition edn. TecDoc, Paris
- Joly D, Bois B, Zaksek K (2012) Rank-ordering of topographic variables correlated with

- temperature. *Atmospheric and Climate Sciences* 02:139-147.
<https://doi.org/10.4236/acs.2012.22015>
- Jones G (2007) Climate change: observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. Whitman College Economics Department working paper 7:1-14
- Jones GV (2006) Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. *Fine Wine and Terroir: The Geoscience Perspective*:1-14
- Jones GV, Alves F (2012) Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal *International Journal of Global Warming* 4:383-406. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2012.049448>
- Jones GV, Davis RE (2000) Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture* 51:249-261
- Jones GV, Webb LB (2010) Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research* 21:103-106.
<https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530091>
- Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K (2005) Climate change and global wine quality. *Climatic Change* 73:319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Kliewer W (1973) Berry composition of *Vitis vinifera* cultivars as influenced by photo- and nycto-temperatures during maturation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*
- Kliewer WM, Torres RE (1972) Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *American Journal of Enology and Viticulture* 23:71-77
- Lebon E (2002) Changements climatiques : Quelles conséquences pour la viticulture ? Paper presented at the 6emes Recontres Rhodaniennes, Orange, France
- Luterbacher J, Dietrich D, Xoplaki E, Grosjean M, Wanner H (2004) European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303:1499-1503. <https://doi.org/10.1126/science.1093877>
- MeteoSwiss (2016) Rapport climatologique 2015. MeteoSwiss, Zurich
- Molitor D, Junk J (2019) Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region. *OENO One* 53:409-422. <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.3.2329>
- Morales-Castilla I, García de Cortázar-Atauri I, Cook BI, Lacombe T, Parker A, van Leeuwen C, Nicholas KA, Wolkovich EM (2020). Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117:2864-2869. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>
- Moriondo M, Jones GV, Bois B, Dibari C, Ferrise R, Trombi G, Bindi M (2013) Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change* 119:825-839.
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0739-y>
- Nicholas KA, Matthews MA, Lobell DB, Willits NH, Field CB (2011) Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. *Agricultural and Forest Meteorology* 151:1556-1567. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.010>
- OIV (2012) OIV guidelines for vitiviculture zoning methodologies on a soil and climate level.
- Pachauri RK et al. (2014) Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva

- Parker AK, García de Cortázar-Atauri I, Gény L, Spring J-L, Destrac A, Schultz H, Molitor D, Lacombe T, Graça A, Monamy C, Stoll M, Storchi P, Trought MCT, Hofmann RW, van Leeuwen C, 2020. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *Agric. Forest Meteorol.* 285–286, 107902. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902>.
- Parker AK, García de Cortázar-Atauri I, Trought MCT, Destrac A, Agnew R, Sturman A, van Leeuwen C (2020) Adaptation to climate change by determining grapevine cultivar differences using temperature-based phenology models: This article is published in cooperation with the XIIIth International Terroir Congress November 17-18 2020, Adelaide, Australia. Guest editors: Cassandra Collins and Roberta De Bei. *OENO One* 54:955-974. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3861>
- Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pons A, Allamy L, Schüttler A, Rauhut D, Thibon C, Darriet P (2017) What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grape? *OENO One* 51:141-146. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1868>
- Ramos Martín MC, Jones GV, Yuste J (2018) Phenology of Tempranillo and Cabernet-Sauvignon varieties cultivated in the Ribera del Duero DO: observed variability and predictions under climate change scenarios. *OENO One* 52:31-44. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.1.2119>
- Rebetez M (2001) Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology* 69:13-21. <https://doi.org/10.1007/s007040170032>
- Rebetez M, Reinhard M (2008) Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology* 91:27-34. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0296-2>
- Riou C et al. (1994) Le déterminisme climatique de la maturation du raisin application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté européenne. Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg
- Santillán D, Iglesias A, La Jeunesse I, Garrote L, Sotes V (2019) Vineyards in transition: A global assessment of the adaptation needs of grape producing regions under climate change. *Science of The Total Environment* 657:839-852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.079>
- Santos JA, Fraga H, Malheiro AC, Moutinho-Pereira J, Dinis LT, Correia C, Moriondo M, Leolini L, Dibari C, Costafreda-Aumedes S, Kartschall T, Menz C, Molitor D, Junk J, Beyer M, Schultz HR (2020) A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Appl. Sci.* 10:1-28. <https://doi.org/10.3390/app10093092>
- Schultz HR (2000) Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of grape and wine research* 6:2-12. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156.x>
- Seguin B, Garcia de Cortazar I Climate warming: consequences for viticulture and the notion of 'terroirs' in Europe. In, 2005. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp 61-70. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.3>
- Sgubin G, Swingedouw D, Dayon G, García de Cortázar-Atauri I, Ollat N, Pagé C, van Leeuwen C (2018) The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate.

- Agricultural and Forest Meteorology 250-251:226-242.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>
- Shaw TB (2012) A climatic analysis of wine regions growing pinot noir. *Journal of Wine Research* 23:203-228. <https://doi.org/10.1080/09571264.2012.697356>
- Spayd SE, Tarara JM, Mee DL, Ferguson JC (2002) Separation of sunlight and temperature effects on the composition of vitis vinifera cv. Merlot berries. *American Journal of Enology and Viticulture* 53:171-182.
- Spring J-L, Zufferey V (2009) Influence de l'irrigation sur le comportement de la vigne et sur la qualité de vins rouges dans les conditions du Valais central. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture* 41:103-112
- Stock M, Gerstengarbe FW, Kartschall T, Werner PC Reliability of climate change impact assessments for viticulture. In, 2005. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp 29-40. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.1>
- Tate AB (2001) Global warming's impact on wine *Journal of Wine Research* 12:95-109
[doi:10.1080/09571260120095012](https://doi.org/10.1080/09571260120095012)
- Team RC (2013) R: A language and environment for statistical computing
- Tomasi D, Jones GV, Giust M, Lovat L, Gaiotti F (2011) Grapevine phenology and climate change: relationships and trends in the Veneto region of Italy for 1964–2009. *American Journal of Enology and Viticulture* 62:329-339.
<https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108>
- Tonietto J, Carbonneau A (2004) A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124:81-97.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>
- Unwin T (2005) *Wine and the vine: an historical geography of viticulture and the wine trade*. Routledge, London
- Urhausen S, Brienen S, Kapala A, Simmer C (2011) Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Moselle region. *Climatic Change* 109:349-373.
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0059-z>
- van Leeuwen C, Darriet P (2016) The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics* 11:150-167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- van Leeuwen C, Friant P, Choné X, Tregoat O, Koundouras S, Dubourdieu D (2004) Influence of climate, soil, and cultivar on Terroir. *American Journal of Enology and Viticulture* 55:207-217
- van Leeuwen C et al. (2013) Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110:E3051-E3052. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307927110>

Supplementary Material

Table 2.3. Location, type, source, first complete year of data record, and number of missing values for each station.

Name	Elev. M a.s.l.	Long. LV03	Lat. LV03	Type	Source	Data since ...	Tmax NA replaced	Tmean NA replaced
MMBOY	510	553199	200608	Tmin and Tmax (°C)	MS	2013	127 (8.48%)	127 (8.48%)
CHM	1136	565060	211006	Tmin and Tmax (°C)	MS	1984	0	0
CRM	431	571160	210800	Tmin and Tmax (°C)	MS	1992	190 (3.17%)	193 (3.22%)
NEU	485	563086	205559	Tmin and Tmax (°C)	MS	1874	0	0
CHP	490	540540	187685	Tmin and Tmax (°C)	AG	2006	156 (5.21%)	257 (8.58%)
CON	449	545910	189800	Tmin and Tmax (°C)	AG	2017	0	0
CRS	440	569703	211424	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	13 (0.47%)	112 (4.03%)
GOR	472	550709	195300	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	3 (0.11%)	64 (2.30%)
PRA	445	573722	200314	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	0	0
TWA	460	580110	217085	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	20 (0.72%)	123 (4.42%)
ST001	494	556889	203227	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST002	451	556780	202606	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST003	441	555152	200667	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST004	435	557587	203060	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST005	476	554953	199127	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST006	511	553533	201286	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST007	627	552986	202206	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST008	702	552655	202681	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST009	752	552257	203175	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST010	864	552143	203864	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST011	874	554903	206796	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST012	1037	552888	204729	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST013	785	554761	204936	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST014	660	554805	203626	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST015	597	556363	203887	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST016	578	557261	204039	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST017	528	557606	203628	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST018	791	556028	205090	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST019	929	554575	206781	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0

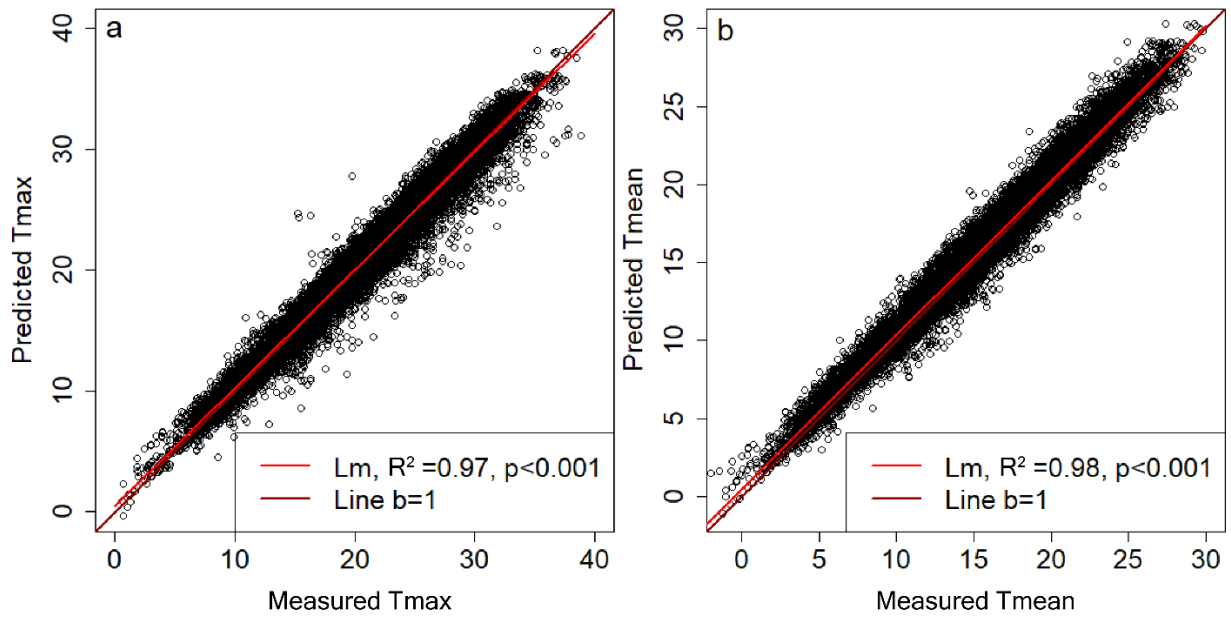


Figure 2.7. Cross-section between daily maximum (a) and mean (b) temperature data and values predicted by the adiabatic lapse rate model for each day and each station except CHM. The scale differs between the panels.

3. Les conditions climatiques futures pourraient menacer les possibilités d'adaptation du vignoble neuchâtelois aux changements climatiques

Titre original de l'article: Future climatic conditions may threaten adaptation capacities for vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland

Valentin Comte^{*1,2}, Léonard Schneider^{1,2}, Pierluigi Calanca³, Vivian Zufferey⁴ and Martine Rebetez^{1,2}

¹University of Neuchatel, Institute of Geography, Neuchatel, Switzerland

²Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Neuchatel, Switzerland

³Agroscope Reckenholz, Zurich, Switzerland

⁴Agroscope Forschungszentrum, Pully, Switzerland

*Corresponding author: valentin.comte@unine.ch

Abstract

In Switzerland, as elsewhere in the world, climate change is challenging viticulture. Knowledge of the potential impacts is essential for preparing adaptation measures. Two aspects directly impacted by increasing temperatures are the choice of grapevine varieties and the location of vineyards. To help address these impacts, we analysed future trends in two bioclimatic indices, average growing season temperature (GST) and Huglin's heliothermal index (HI), in the Swiss canton of Neuchatel. We conducted our analysis based on regional climate change scenarios referring to the emission pathways RCP4.5 and RCP8.5. Under the assumption of RCP8.5, trends in GST and HI indicate that the climate in this region will become too hot for most grapevine varieties currently cultivated, especially Pinot noir. Moreover, adaptation problems under RCP8.5 are expected to originate from an increase in climate extremes in both temperature and precipitation. Results based on RCP4.5 indicate a broader scope for adaptation, as the climate will remain suitable for a larger number of grapevine varieties within the current altitudinal limits of the Neuchatel vineyards. In theory, an altitudinal shift of Pinot noir would also be possible under this emission pathway. In practice, however, the possibility of establishing vineyards above 600 m would be limited by the presence of protected forests and rocky areas. Our results highlight that vineyards in this region will need important adaptation measures if anthropic greenhouse gas emissions do not decrease rapidly and considerably, limiting the global temperature increase to < 1.5 °C.

bioclimatic index, climate adaptation, climate change, regional climate model, viticulture suitability

3.1. Introduction

Centuries of selection and experimentation by winegrowers have resulted in thousands of grapevine varieties cultivated in well-adapted wine regions (Huglin, 1978; Moriondo et al., 2013; Unwin, 2005). In addition to climatic parameters, other elements of the terroir play an important role in the production of high-quality wine (Bonfante & Brillante, 2022). These include soil factors (soil type, texture and depth), physiological factors (leaf/canopy area, canopy evapotranspiration and rooting depth), cultural and oenological practices (cover crop management and irrigation), and their interactions (Bonfante et al., 2017; Bramley et al., 2011; Brillante et al., 2018; Huglin & Schneider, 1998; Spangenberg & Zufferey, 2018; van Leeuwen & Seguin, 2006).

Nevertheless, climate, in particular temperature, remains the most important factor determining the geography of wine-producing regions and the choice of wine varieties (Huglin & Schneider, 1998; G. V. Jones, 2007), and it has been anticipated that grapevines will be among the plants most impacted by global warming (Jones & Webb, 2010). The rise in air temperature is expected to induce increasingly early phenological stages of grapes in spring and early summer (Cook & Wolkovich, 2016; Duchêne & Schneider, 2005; Fraga et al., 2017; Jones & Webb, 2010; Laget et al., 2008; Molitor & Junk, 2019). With harvests taking place earlier in a warmer climate, the typicity of wines is also likely to be affected in vineyards around the world (Jones & Webb, 2010; Spayd et al., 2002; van Leeuwen & Darriet, 2016). The sugar level and potential alcohol content of wines are anticipated to increase, while the total acidity of grape berries and wines is expected to decrease (Battaglini et al., 2009; De Orduna, 2010; Laget et al., 2008; Schultz, 2000). Warmer conditions are also likely to alter other aromatic and phenolic elements (De Orduna, 2010; Dequin et al., 2017).

Beyond the rise in air temperature, climate change also involves an increase in solar radiation and in heatwave frequency and duration in Western Europe, increasing the risk of sunburn to grapevines (IPCC, 2021; Sgubin et al., 2018; Stock et al., 2005). Temperatures above 35 °C can be particularly problematic for the cultivation of vines, regardless of the grape variety, especially if they occur on consecutive days as a heat wave (Kliewer, 1977; Spayd et al., 2002).

The simultaneous increase in heat waves and drought could induce more frequent physiological disorders, such as berry shrivelling and xylem embolism formation in some grape varieties (Lovisolò et al., 2008; Zufferey et al., 2011; Zufferey et al., 2022). Climate change will also lead to changes in rainfall regime, intensifying climatic demand and water deficits during the growing season, with impacts on phenology and on grape and wine quality (van Leeuwen et al., 2009; Zufferey et al., 2017). Finally, hailstorms may cause considerable losses in European vineyards, and an increase has been observed in the frequency and intensity of hail and rainstorm events during the last decades (IPCC, 2021; Raupach et al., 2021).

Short-term adaptation strategies consist of changes to cultural and vinification practices. The vineyards currently situated in the warmest areas and without possibilities of altitudinal shifts will probably disappear progressively in the coming decade if other adaptation solutions are not found (Morales-Castilla et al., 2020; Moriondo et al., 2013; Stock et al., 2005). It is also likely that viticulture will witness altitudinal and latitudinal shifts in the cultivated grape varieties (Fraga et al., 2012; G. V. Jones, 2007). The northern limits of current viticultural areas in the Northern Hemisphere will probably move further northward, and the cultivation of high-quality wines is expected to expand into more northern latitudes (Doutreloup et al., 2022; Jones et al., 2022; Morales-Castilla et al., 2020; Nesbitt et al., 2022).

Adaptation strategies will be key to the success of vineyards in the future. It is possible to adapt on a short- or medium-term basis by changing the genetic material (rootstocks and clone types) of the cultivated grape varieties, the water regime (e.g., installation of irrigation systems), and the cultivation practice and vine care (e.g., agroforestry, canopy management and late pruning; (van Leeuwen & Destrac-Irvine, 2017; van Leeuwen et al., 2009). Winemaking techniques, e.g., to decrease the alcohol content, are another adaptation possibility (Dequin et al., 2017; Tilloy et al., 2015). As site conditions in vineyards vary at the local scale, adaptation measures may vary at this scale as well (Quénol et al., 2019). There are indeed important meso and microclimatic disparities at the local scale between the vineyards most exposed to higher temperatures, i.e., at low altitude, with a southern orientation, and on the edge of a lake, and areas that were formerly less suitable for viticulture, i.e., areas less exposed to sun or bowl-shaped.

In viticulture, adaptation decisions need to be made at an early stage, as the plants need three to four years of growth before the first production, and the lifespan of established vineyards

is a few decades. Specific information on climate change and its effects on grapevines at the regional scale is, therefore, essential for guiding adaptation. In this context, it is worth noting that several bioclimatic indices have been developed to characterise the link between climate and vineyards and to define the conditions and suitability for vine growing. Examples of such indices are the Winkler index (WI), Huglin's heliothermal index (HI), Cool night index (CI), and other growing degree days indices (GDDs) (Jones et al., 2005; Tonietto & Carbonneau, 2004). Two such indices are considered in the present study. The first is the average growing season temperature (GST), an index that can be used to analyse the potential suitability of terroir to different grape varieties using air temperature alone (Jones et al., 2005; OIV, 2012). The second is Huglin's heliothermal index (HI), which is highly correlated with an adequate sugar level at harvest (Huglin & Schneider, 1998) and may indicate the optimum cultivation conditions for various grape varieties.

Intended as an extension of a previously published study (Comte et al., 2022), the overall goal of this study is to examine future trends in GST and HI in the canton of Neuchatel, a region of Switzerland where the total wine cultivation area is small but where viticulture has a long tradition and represents an important pillar of the agricultural sector. On the one hand, we analyse the evolution of thermal conditions at a representative weather station for Neuchatel, discussing in detail the implications of the resulting trends for the choice of varieties. On the other hand, we present GST and HI maps targeting the two periods 2035–2064 and 2070–2099. The maps illustrate the geographic implications of increasing temperatures for the wine cultivation zones of the canton of Neuchatel during the 21st century.

In Switzerland, temperatures have been rising twice as fast as the global average (CH2018, 2018; Rebetez & Reinhard, 2008). Swiss vineyards have generally benefited from climate change until now, as Switzerland is located near the cooler limit of vine growing (Zufferey et al., 2022). Wine quality has been improving over the last decades (thanks to an increased maturity of some varieties, especially the late ones), there is more diversity in grape varieties, and the harvests are more regular (Zufferey et al., 2022). Swiss wine regions commonly experience spring frost, but this risk does not appear to be increasing below 800 m a.s.l. (Vitasse & Rebetez, 2018; Vitasse et al., 2018).

In addition to observed weather data covering 1971–2020, we base our analysis on an ensemble of climate change scenarios developed for Switzerland by the National Centre for

Climate Services (NCCS), which is available to researchers as the so-called CH2018 scenarios (CH2018, 2018). The CH2018 scenarios refer to three different emission pathways: the Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6, 4.5 and 8.5 (Meinshausen et al., 2011). Here we limit our attention to RCP4.5 and RCP8.5, the two scenarios involving the most significant changes in thermal conditions.

3.2. Materials and methods

3.2.1. Bioclimatic indices

As mentioned above, we adopted the average growing season temperature (GST; Jones et al. (2005)) and Huglin's heliothermal index (HI; (Huglin & Schneider, 1998)) to gauge the impact of climate change on the conditions for wine cultivation. For locations in the Northern Hemisphere, GST is defined as the daily mean temperature (T_{mean}) between 1 April and 31 October:

$$GST = \frac{1}{214} \sum_{01.04}^{31.10} T_{mean}$$

HI is defined as

$$HI = k \sum_{01.04}^{30.09} \left(\frac{T_{mean} + T_{max}}{2} - 10 \right)$$

where, as before, T_{mean} is the daily mean temperature, T_{max} is the daily maximum temperature, and k (~ 1.05 for Neuchatel) is a factor that depends on latitude.

For both indices, a generic classification of current grapevine varieties has been proposed in relation to GST (Jones et al. (2005) and to HI (Huglin & Schneider, 1998) Table 3.1).

Table 3.1. Climatic classes for Huglin’s heliothermal index and average growing season temperature

Very cool <1500	None	None	None
Cool 1500–1800	Muller-Thurgau, Blauer Portugieser, Pinot blanc, Pinot gris, Aligoté, Gamay noir, Gewürztraminer, Pinot noir, Riesling, Chardonnay, Sylvaner, Sauvignon blanc, Melon	Cool 13–15 °C	Muller-Thurgau, Gamay, Pinot gris, Gewurtztraminer, Riesling, Pinot noir, Chardonnay
		Intermediate 15–17 °C	Riesling, Pinot noir, Chardonnay, Sauvignon blanc, Sémillon, Cabernet Franc, Tempranillo, Merlot, Malbec, Syrah, Dolcetto, Viognier
Temperate 1800–2100	Cabernet Franc, Blaufrankisch, Chenin blanc, Cabernet, Merlot, Sémillon, Riesling, Ugni blanc	Warm 17–19 °C	Sauvignon blanc, Sémillon, Cabernet Franc, Tempranillo, Dolcetto, Merlot, Malbec, Viognier, Syrah, table grapes, Cabernet Sauvignon, Sangiovese, Grenache, Carignan, Zinfandel, Nebbiolo, raisins
			table grapes, raisins
Temperate warm 2100–2400	Grenache, Syrah, Cinsaut, Carignan, Aramon		
Warm 2400–3000	None	Hot 19–22 °C	
Hot >3000	None		

Climate optimum for different grape varieties for two bioclimatic indices: Huglin’s heliothermal index (HI) and average growing season temperature (GST). Adapted from (Jones, 2006) and (Huglin & Schneider, 1998)

3.2.2. Study area

The study area includes the vineyard region along the edge of Lake Neuchatel in Switzerland (Figure 3.1). All vineyards are located below 600 m a.s.l. (Figure 3.1). Neuchatel vineyards (about 600 ha) have historically been located in a cool climate region in terms of the growing season temperature (13 to 15 °C) and in a very cool climate in terms of HI (<1500). Pinot noir

(55 %) and Chasselas (27 %) are the main grape varieties of these vineyards. The vineyards of Neuchatel lie on a bedrock of yellow Jura limestone, covered in part by more or less compact glacial moraine. However, Pinot noir is generally found on more sandy soils than those with Chasselas. Most of the vines are pruned in simple Guyot.

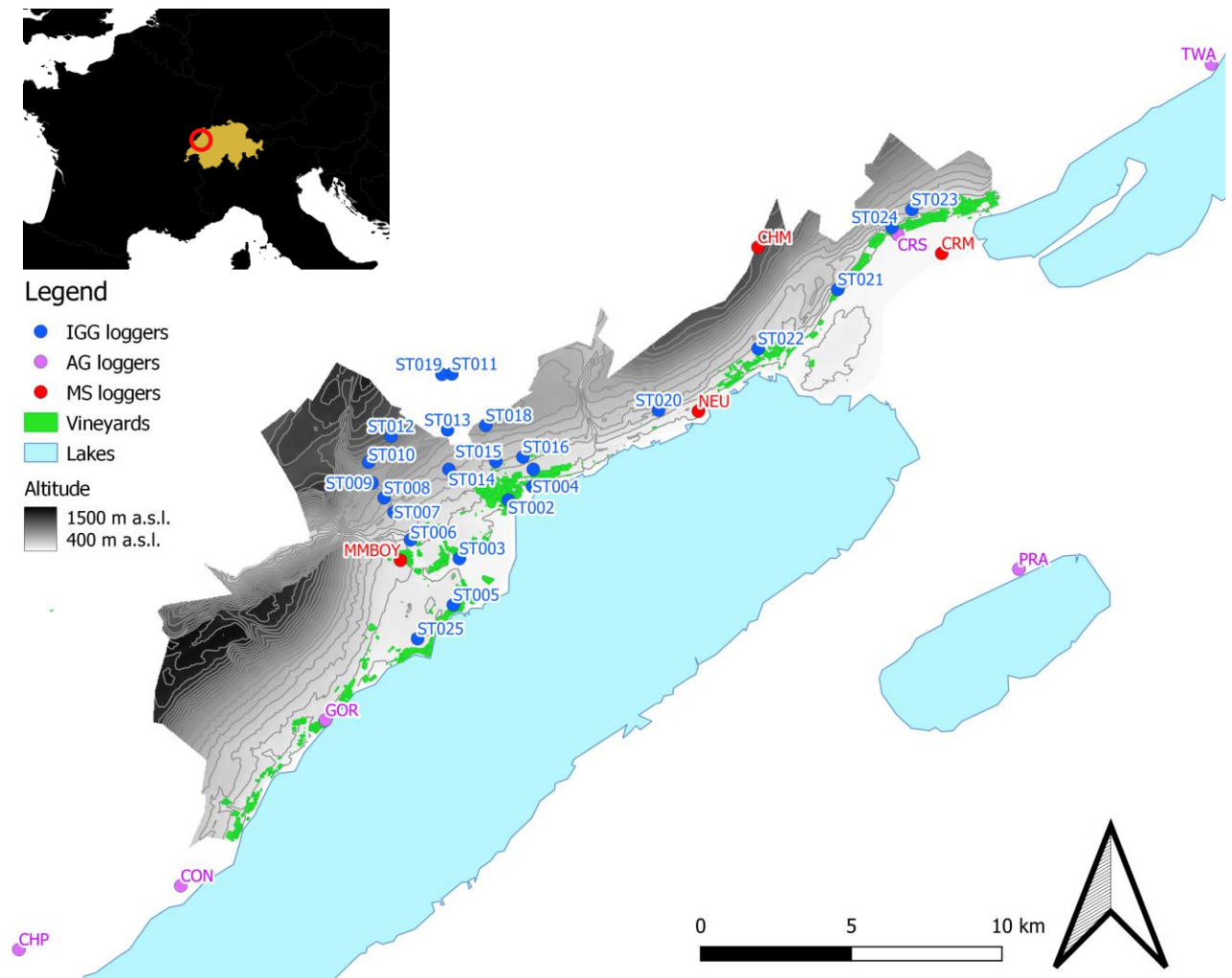


Figure 3.1. Locations of Neuchatel vineyards and of the air temperature loggers. IGG loggers are our own, AG loggers are from Agroscope, and MS loggers are from MeteoSwiss. Precise logger coordinates (longitude, latitude and altitude) are detailed in the Supplementary Material. Acronyms: IGG = Institut de Géographie, University of Neuchatel; AG = Agrometeo; MS = Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss); ST = station.

3.2.3. Data

For our analysis, we used daily minimum (Tmin) and maximum (Tmax) air temperature. Data covering the recent decades were obtained from the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss, 4 stations; <https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/>), a network of

proprietary agrometeorological stations (Agrometeo, 6 stations; <http://www.agrometeo.ch/fr/meteorology/datas>), and 25 of our own temperature loggers recording air temperature (°C) at 2 meters above the ground. We systematically used homogenised data from MeteoSwiss when available. Most of the Agrometeo loggers and our own loggers are located within the study area, but four of them (TWA, PRA, CHP, CON) are located outside the perimeter of the study, yet in similar conditions and in vineyards areas. The temperature loggers produced an average lapse rate for the vineyard region, which explained 97 % of the observed regional temperature variability (Comte et al., 2022).

To simulate future trends in the selected bioclimatic indices, we used the local scenarios for the Neuchatel station available from the repository maintained by NCCS (CH2018, 2018). The Neuchatel station (NEU) used in the CH2018 dataset is located at 485 m a.s.l. and is representative of the average climate of the Neuchatel vineyards (Comte et al., 2022). The data repository includes downscaled data for a range of GCM-RCM chains from EURO-CORDEX, and it provides daily temperature data (Tmin, Tmean and Tmax) for main MeteoSwiss stations (CH2018, 2018). For the emission pathways, we selected the widely used RCP4.5 and RCP8.5 scenarios (Pachauri et al., 2014a). The number of individual model chains used in our study was 17 for RCP4.5 and 22 for RCP8.5. For developing GST and HI maps, we focused on a single model chain, namely SMHI-RCA4 ECEARTH EUR11, which is representative of the ensemble scenarios (CH2018, 2018).

3.2.4. Methods

As a first stage, we considered, for each RCP, the full ensemble of available CH2018 scenarios for discussing the overall evolution in GST and HI up to the end of the current century. For illustrative purposes, we filtered the time series using a Kolmogorov–Zurbenko filter (Zurbenko & Smith, 2018), and we used the filtered time series to assess the exceedance probability for given GST and HI thresholds. This step was meant to translate the “time of emergence” (Hawkins & Sutton, 2012) into a “time of action”, i.e., to determine the time when a switch in grapevine varieties is likely to become a must rather than a choice.

In the second stage, we examined in more detail the evolution of thermal conditions at the Neuchatel weather station, limiting the focus to the SMHI-RCA4 ECEARTH EUR11 model chain.

For discussing the trends, we refer to the climatic classes proposed by Jones (2006) and by Huglin and Schneider (1998) as shown in Table 1.

Finally, we used this same model chain to construct GST and HI maps valid for 2035–2064 and 2070–2099. The maps illustrate the regional GST and HI patterns within the littoral region borders of the canton of Neuchatel around the middle and end of the present century, providing a basis for discussion of the regional suitability of future conditions for grapevine cultivation. We developed the maps following the approach described in detail in Comte et al. (2022), i.e., using the adiabatic lapse rate average per month to project the results obtained for the Neuchatel weather station onto a high-resolution digital elevation model, making use of the Swiss reference geodetic system (CH1903, EPSG:21781). Referring to Comte et al. (2022), we note that the adiabatic lapse rates explain 97 % of the temperature variations within the Neuchatel wine country.

All analyses were performed using the R statistical software, version 4.1.1 (R Core Team, 2019).

3.3. Results

3.3.1. Current climate of Neuchatel vineyards

In terms of GST, the climate characterising the Neuchatel vineyards was intermediate during the period 1991–2020, with temperatures ranging from 16 °C along the edge of the lake to 15.1 °C at the highest altitudes (Figure 3.2). HI ranged from 1750 along the edge of the lake to 1560 at higher altitudes. Referring to Huglin and Schneider (1998), the climate of Neuchatel vineyards was cool to temperate during this period.

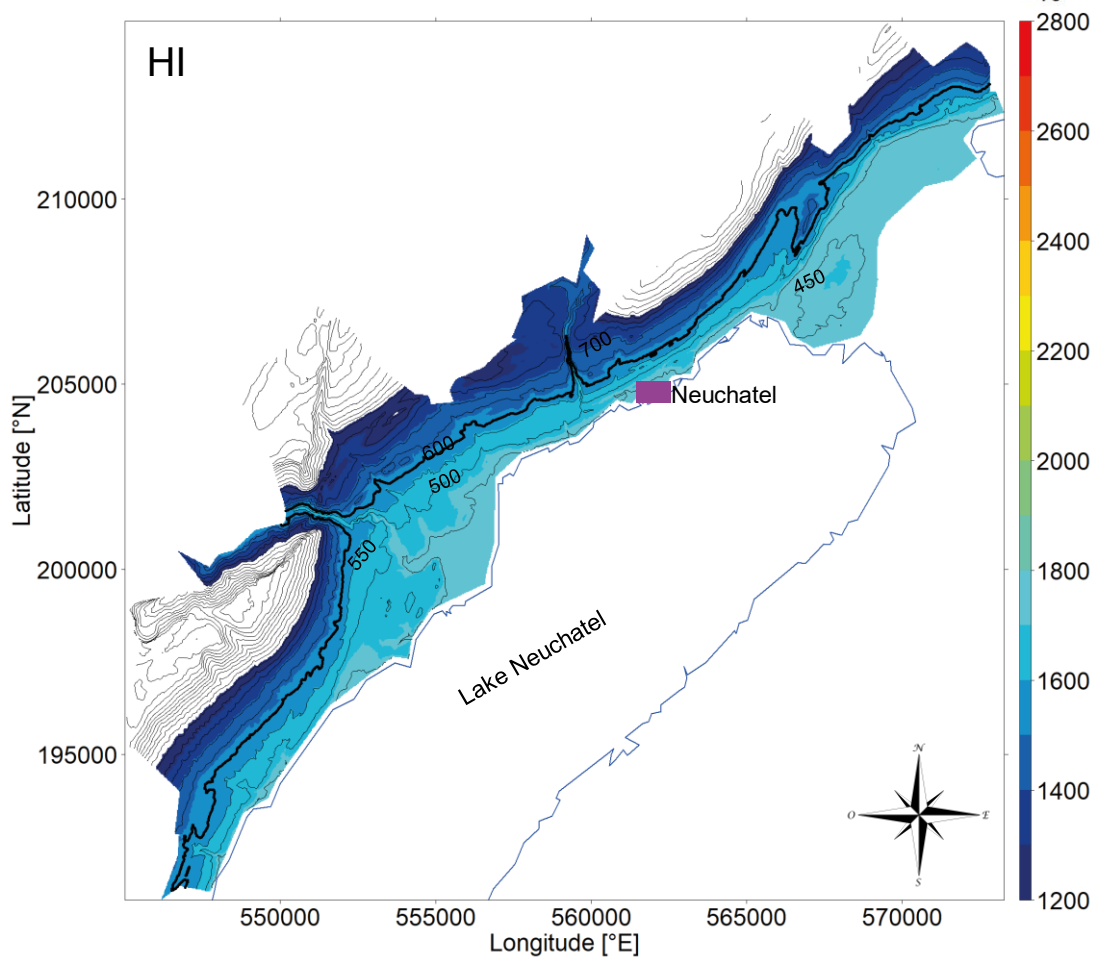
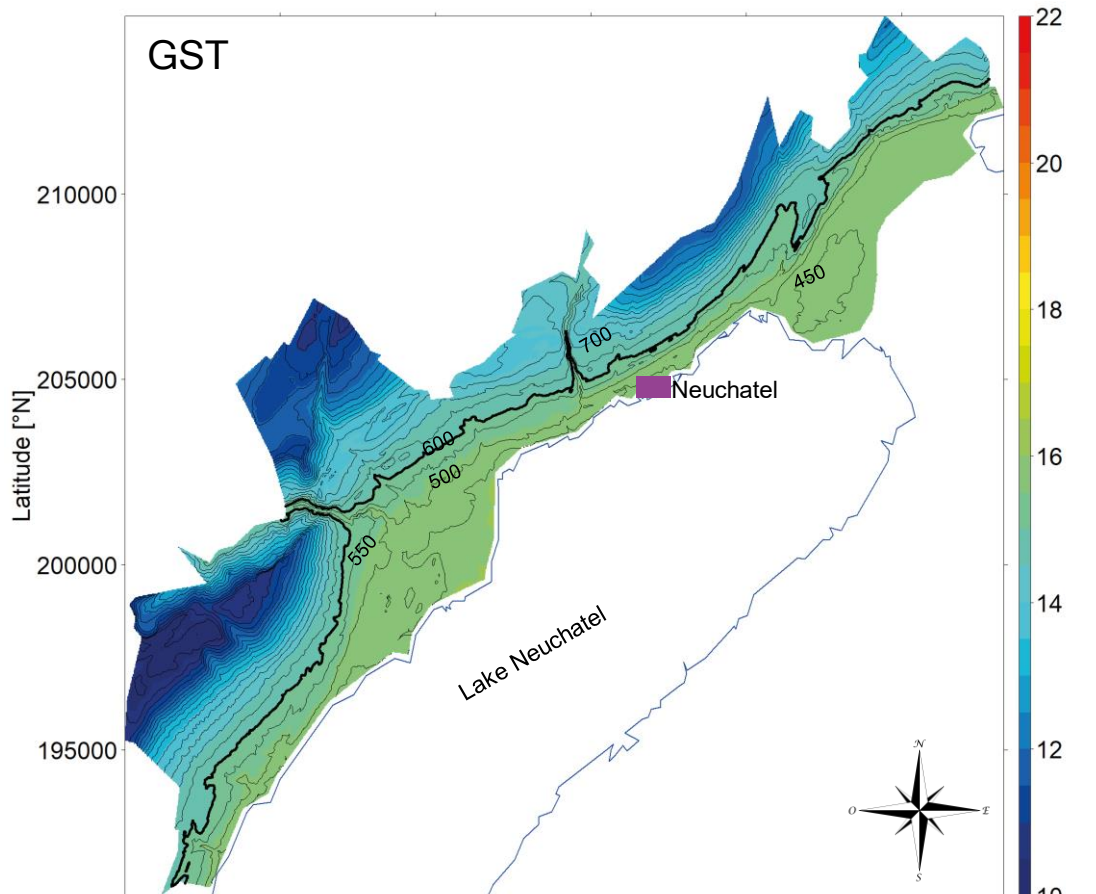


Figure 3.2. Average growing season temperature (GST) and Hugin’s heliothermal index (HI) in Neuchatel vineyards during the period 1991–2020. The bold black line indicates the altitudinal limit of the vineyards (600 m a.s.l.). Longitude and latitude are given according to the Swiss reference system CH1903 (EPSG:21781).

3.3.2. Trends in GST and HI with RCP4.5 and RCP8.5 with all RCMs

The long-term evolution of GST and HI at the MeteoSwiss NEU station from 1980 to 2099, with RCP4.5 and RCP8.5 and all the available RCMs of the CH2018 dataset, is shown in Figure 3.3. The filtered data show that not all RCMs are able to reproduce the trend observed over 1980–2020 (Figure 3.3). A notable exception is RCM SMHI-RCA4-ECEARTH EUR11 (SRE-KZ), which simulates the observed trend accurately (Figure 3.3). Until the middle of the 21st century, the RCMs do not show important differences between RCP4.5 and RCP8.5.

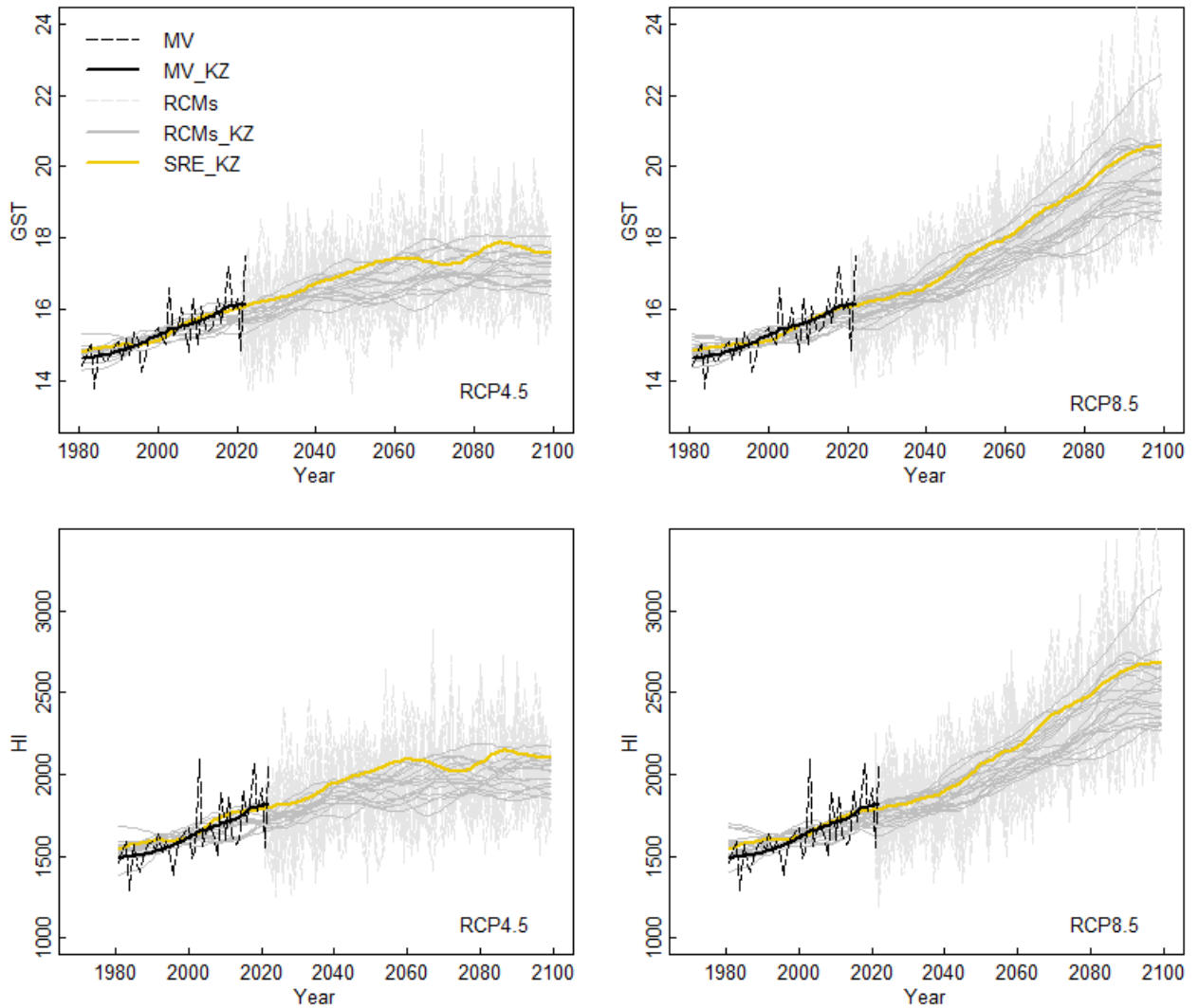


Figure 3.3. Trends in average growing season temperature (GST) and Huglin's heliothermal index (HI) with all available data of the CH2018 dataset with RCP4.5 and RCP8.5. MV are measured values, KZ is the Kolmogorov–Zurbenko filter, RCMs are the CH2018 regional climate model data, and SRE is the RCM SMHI-RCA4-ECEARTH_EUR11.

With respect to the classification indicated in Table 3.1, more than half of the model chains indicate a GST above 17 °C (transition from intermediate to warm conditions) by 2070 with RCP4.5, but already by 2049 with RCP8.5 (Figure 3.4). Under RCP8.5, all models indicate a GST above 17 °C by the end of the century. Concerning the 19 °C threshold (transition between warm and hot conditions), only a few models indicate its exceedance with RCP4.5, while with RCP8.5, more than half of the models suggest its exceedance after 2082 (Figure 3.4).

Regarding HI, exceedance of the 1800 threshold (transition from cool to intermediate conditions) is indicated by more than half of the models after 2033 with RCP4.5 and after 2032

with RCP8.5 (Figure 3.4). Exceedance of the 2100 HI threshold is very unlikely under RCP4.5, but at least half of the models based on RCP8.5 suggest this possibility after 2063.

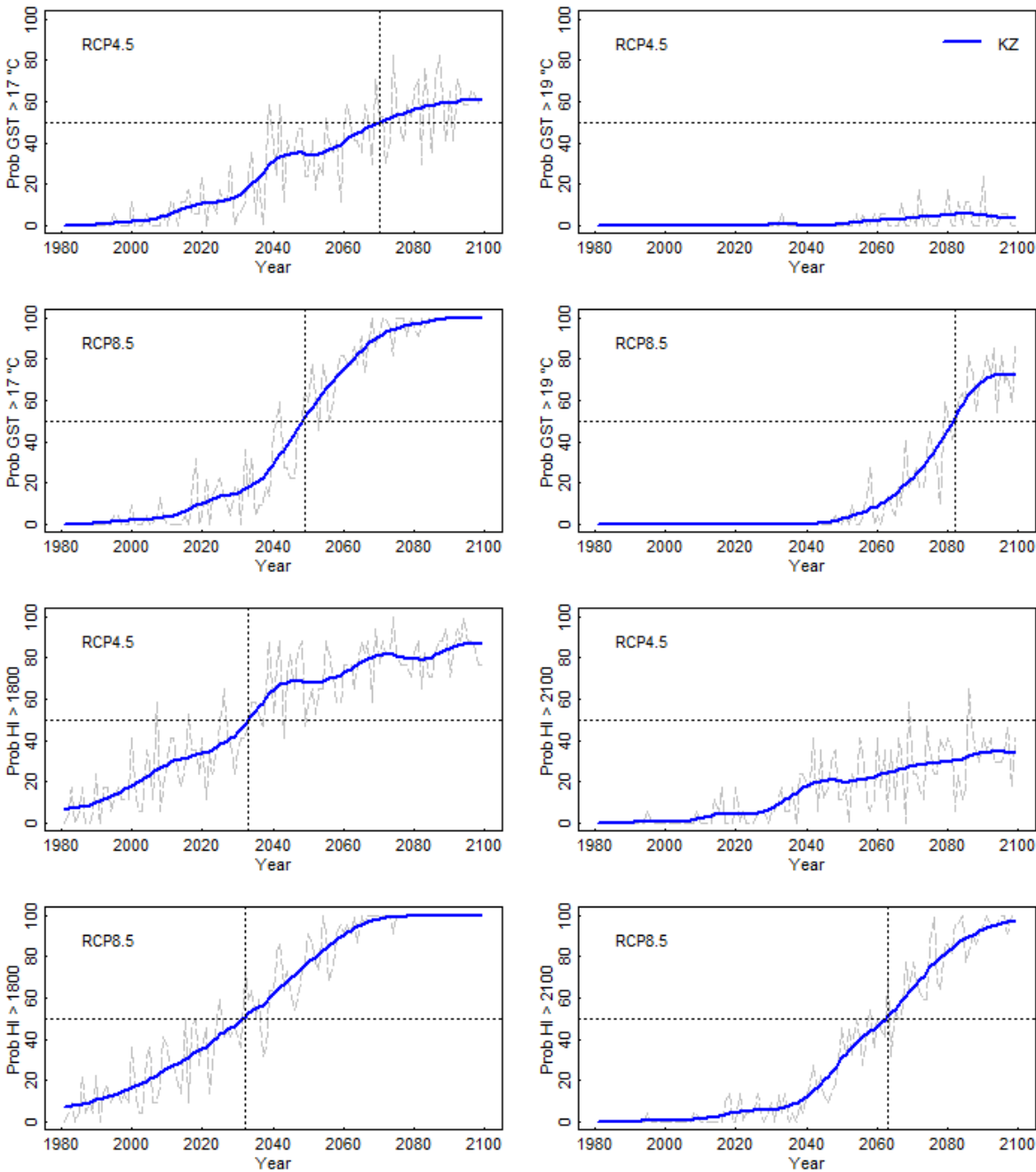


Figure 3.4. The probability that the growing season temperature (GST) exceeds 17 °C (two first panels on the top left) or 19 °C (two panels on the top right), and Huglin's heliothermal index (HI) exceeds 1800 (two panels on the bottom left) or 2100 units (two panels on the bottom right). The probability is computed for each year considering the number of model chains indicating an exceedance of the given threshold divided by the total number of chains included

in the ensemble. The blue lines are a filtered version of the raw estimates obtained by applying a Kolmogorov–Zurbenko filter (filter length = 11 years, 2 iterations).

3.3.3. Future bioclimatic conditions of Neuchatel with a focus on SMHI-RCA4-ECEARTH_EUR11

The long-term evolution of GST and HI at the NEU station from 1980 to 2099, with the SMHI-RCA4-ECEARTH EUR11 RCM under RCP4.5 and RCP8.5, is shown in Figure 3.5. Large differences are apparent between RCP4.5 and RCP8.5 for both GST and HI. Regarding GST, the climate classification shifts from “intermediate” to “warm” by 2040 (Figure 3.5). With RCP8.5, it shifts to “hot” by 2070 (Figure 3.5). Regarding HI, there is a gap between the measured and predicted values with both RCP4.5 and RCP8.5 (Figure 3.5). This suggests that even this model may slightly underestimate the projections. HI values already shifted from “very cold” to “cold” between 1970 and 2015. Since then, they have shifted to the “temperate” classification. Our results indicate that the classification would remain the same in the future under RCP4.5 but with values in the upper part of the classification starting in 2050. Some years would, therefore, belong to the “warm temperate” classification due to interannual variability. With RCP8.5, the classification would become, on average, “warm temperate” by 2060. It would even shift to the “warm” classification by 2080.

The linear trends for three periods (Table 3.2) illustrate the difference between RCP4.5 and RCP8.5 given by the 11-year moving average (Figure 3.5). The trends in GST and HI are more than 1.5 times higher for RCP8.5 (+0.56 GST and +116 HI per decade) than for RCP4.5 (+0.32 GST and +76.5 HI per decade) during 2035–2064. As RCP4.5 is based on a drastic decrease in global annual greenhouse gas emissions by 2040 and a stabilisation of the concentrations by approximately 2060, no upward trend in GST or HI is observed with this scenario for the period 2070–2099 (Table 3.2 and Figure 3.5). Under RCP8.5, the upward trend is significantly steeper for the period 2070–2099 than for 2035–2064 for GST (+0.78 GST per decade) but not for HI (+124.3 HI per decade).

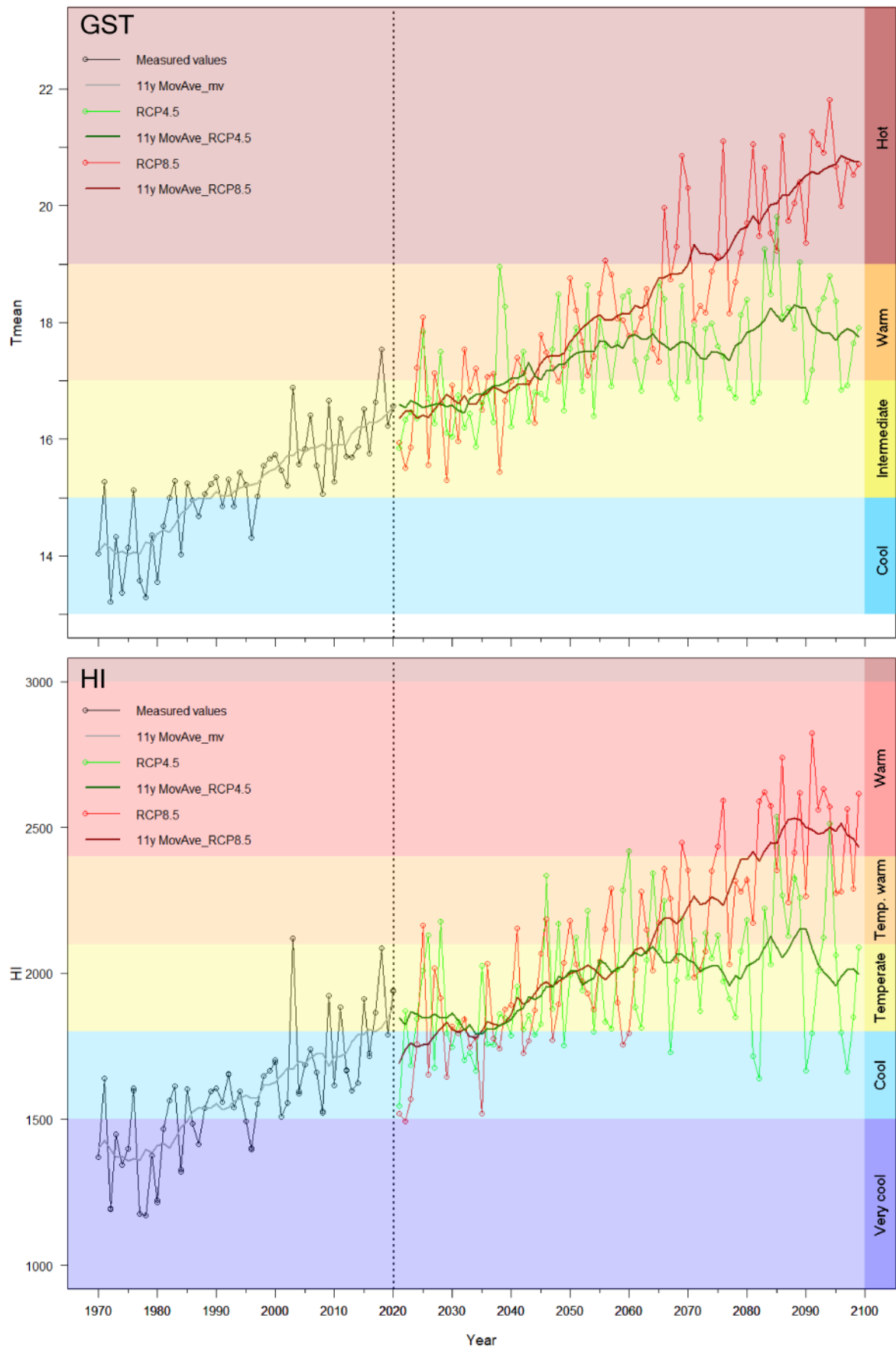


Figure 3.5. Trends in average growing season temperature (GST) and in Huglin’s heliothermal index (HI) at the Neuchatel weather station from 1970 to 2099. Grey circles indicate measured values from 1970 to 2020. Green circles and red circles indicate simulated values under RCP4.5 and RCP8.5, respectively. Eleven-year moving averages are shown as thick solid lines in the corresponding colours. The coloured bands in the background indicate vineyard climate types according to the classifications by Jones (2006) and Huglin and Schneider (1998).

Table 3.2. Linear trends in GST and HI for the NEU station at mid-century (2035–2064) and at the end of the century (2070–2099) under RCP4.5 and RCP8.5.

Data	Period	Trend in GST (per decade)	Trend in HI (per decade)
Measured values	1990–2019	0.52±0.1***	101.9±28.5**
RCP4.5	2035–2064	0.32±0.16*	76.5±35.5*
RCP4.5	2070–2099	None	None
RCP8.5	2035–2064	0.56±0.12***	116±31.9***
RCP8.5	2070–2099	0.78±0.17***	124.3±37.2**

*** = p < 0.001, **=p < 0.01 and *=p > 0.05.

3.3.4. GST maps for mid-century and for the end of the century with RCP4.5 and RCP8.5

The area of the current vineyards (430 to 580 m a.s.l.) is, on average, classified as “warm” for the period 2034–2065 with both scenarios. GST ranges from 17.9 °C (430 m a.s.l.) to 17 °C (580 m a.s.l.) with both RCP4.5 and RCP8.5 (Figures 3.6 and 3.8), corresponding to an increase of 1.9 °C between the two time periods. No significant difference in GST appears between the periods 2035–2064 and 2070–2099 with RCP4.5

The differences between RCP4.5 and RCP8.5 are more pronounced for the period 2070–2099. With RCP4.5, GST varies from 18 °C at lower altitudes to 17.1 °C at higher altitudes, i.e., 580 m a.s.l. (Figures 6 and 8). With RCP8.5, GST varies between 20.2 °C and 19.3 °C (Figures 3.6 and 3.8).

With RCP4.5, the corresponding current viticultural climate conditions (Figure 3.2) would be located above 650 m a.s.l. in 2035–2064 and also in 2070–2099. With RCP8.5, the corresponding current conditions would again be above 650 m a.s.l. in 2035–2064 but would be above 1200 m a.s.l. in 2070–2099 (Figures 3.6 and 3.8).

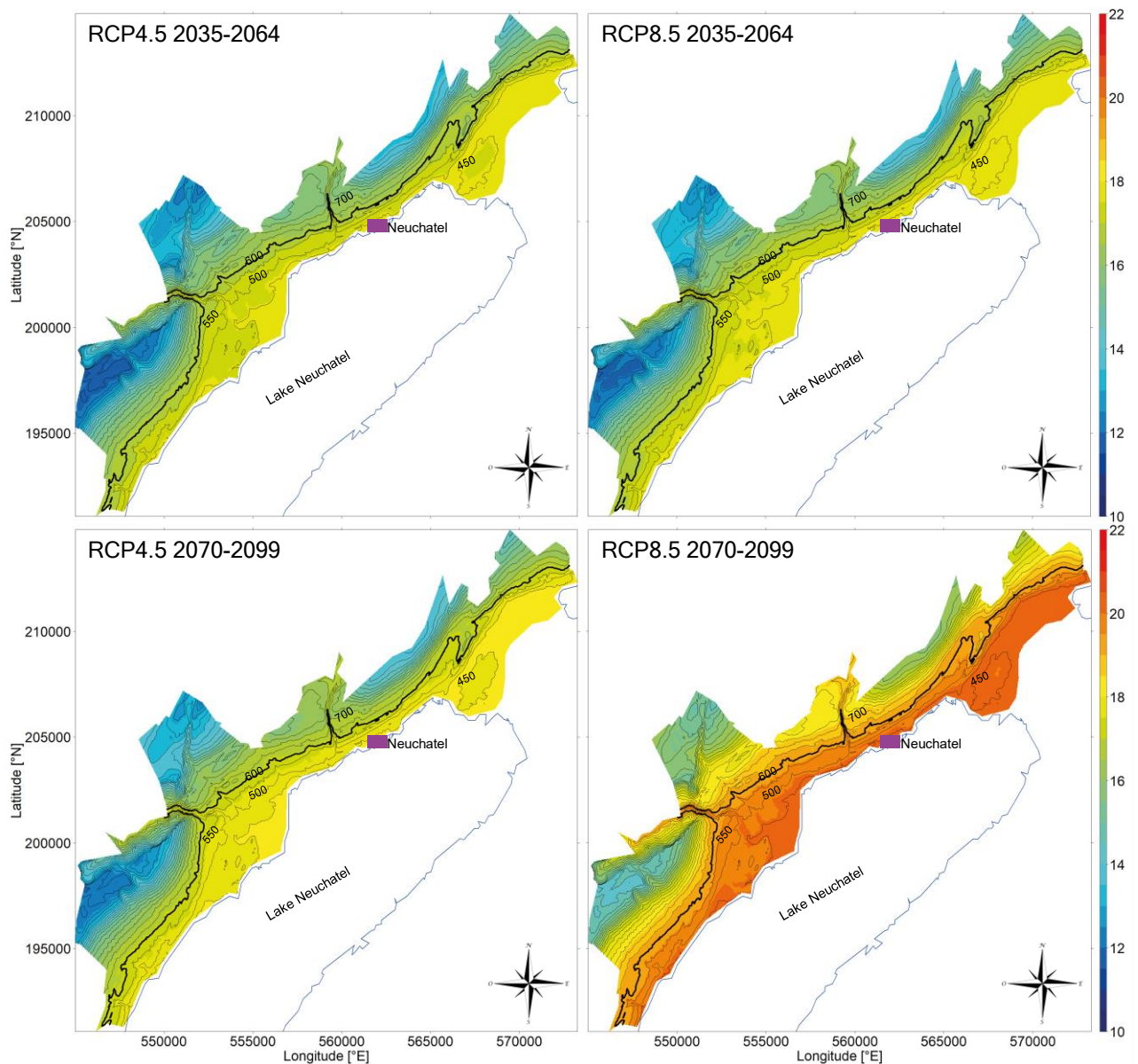


Figure 3.6. Predicted average growing season temperature (GST) for 2035–2064 and 2070–2099 with RCP4.5 and RCP8.5. The bold line indicates the altitudinal limit of the current vineyards (600 m a.s.l.). Longitude and latitude are given according to the Swiss reference system CH1903 (EPSG:21781).

3.3.5. HI maps for mid-century and for the end of the century with RCP4.5 and RCP8.5

For 2035–2064, the current vineyards lie, on average, in climate conditions classified as “intermediate” with both scenarios, and HI values vary between 2100 at the edge of the lake and 1900 at higher altitudes with both RCP4.5 and RCP8.5 (Figures 3.7 and 3.8).

There is no significant difference in HI between the 2035–2064 and 2070–2099 periods with RCP4.5 (Figures 3.5 and 3.6).

The differences between RCP4.5 and RCP8.5 are more pronounced for the period 2070–2099 than for 2035–2064 (Figures 3.7 and 3.8). At the end of the century, HI values vary between 2160 at the edge of the lake and 1960 at higher altitudes with RCP4.5, and between 2620 and 2420 with RCP8.5 (Figures 3.7 and 3.8), i.e., conditions classified as “warm” by Huglin and Schneider (1998).

With RCP4.5, the HI conditions that currently characterise vineyards (Figure 3.2) would be located above 700 m a.s.l. in 2035–2064 and also in 2070–2099. With RCP8.5, the corresponding current conditions would again be above 700 m a.s.l. in 2035-2064 but would be above 1100 m a.s.l. in 2070-2099 (Figures 3.7 and 3.8).

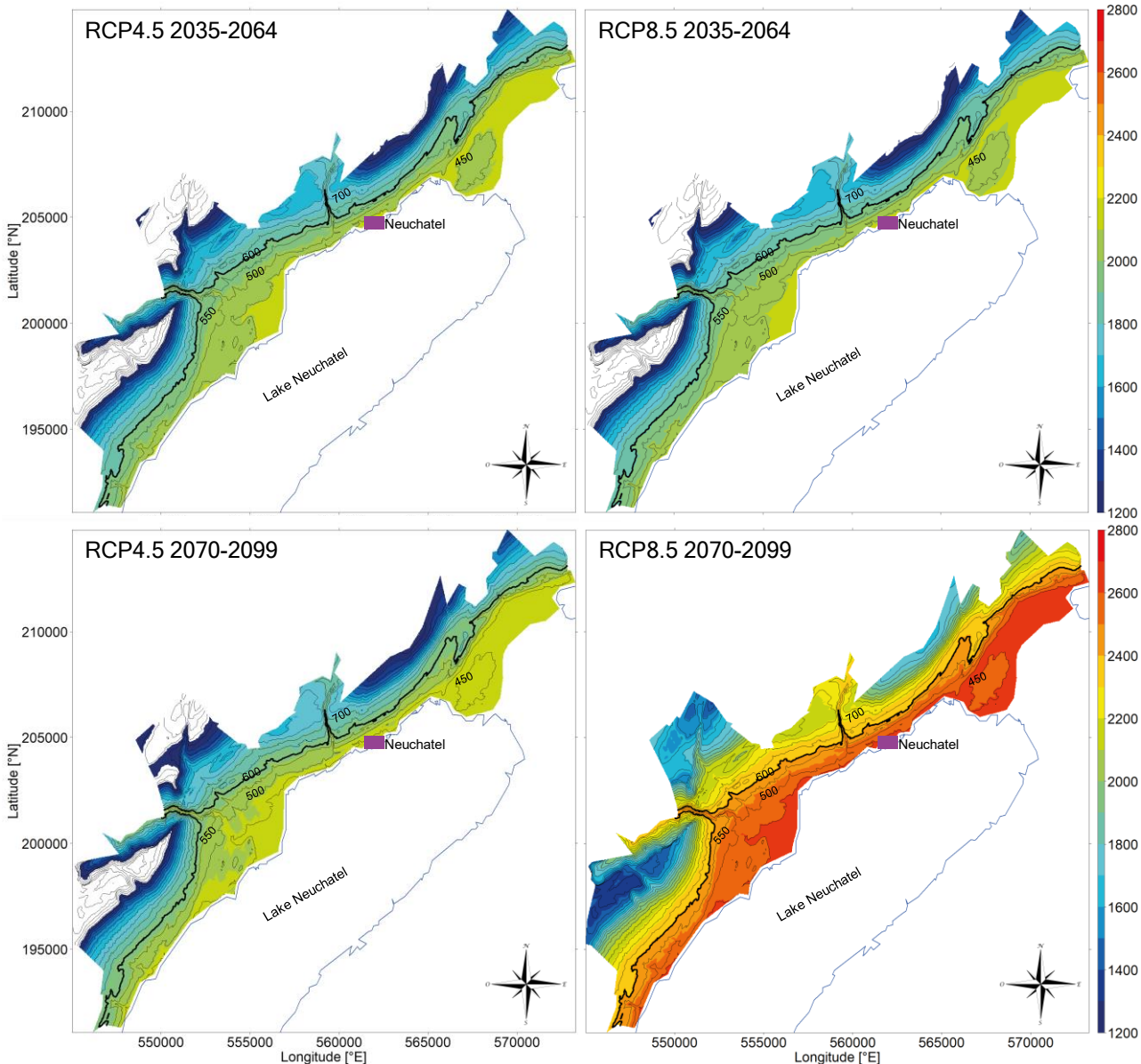


Figure 3.7. Predicted Huglin’s index (HI) values for the 2035–2064 and 2090–2099 periods with RCP4.5 and RCP8.5. The bold line indicates the altitudinal limit of the current vineyards

(600 m a.s.l.). Longitude and latitude are given according to the Swiss reference system CH1903 (EPSG:21781).

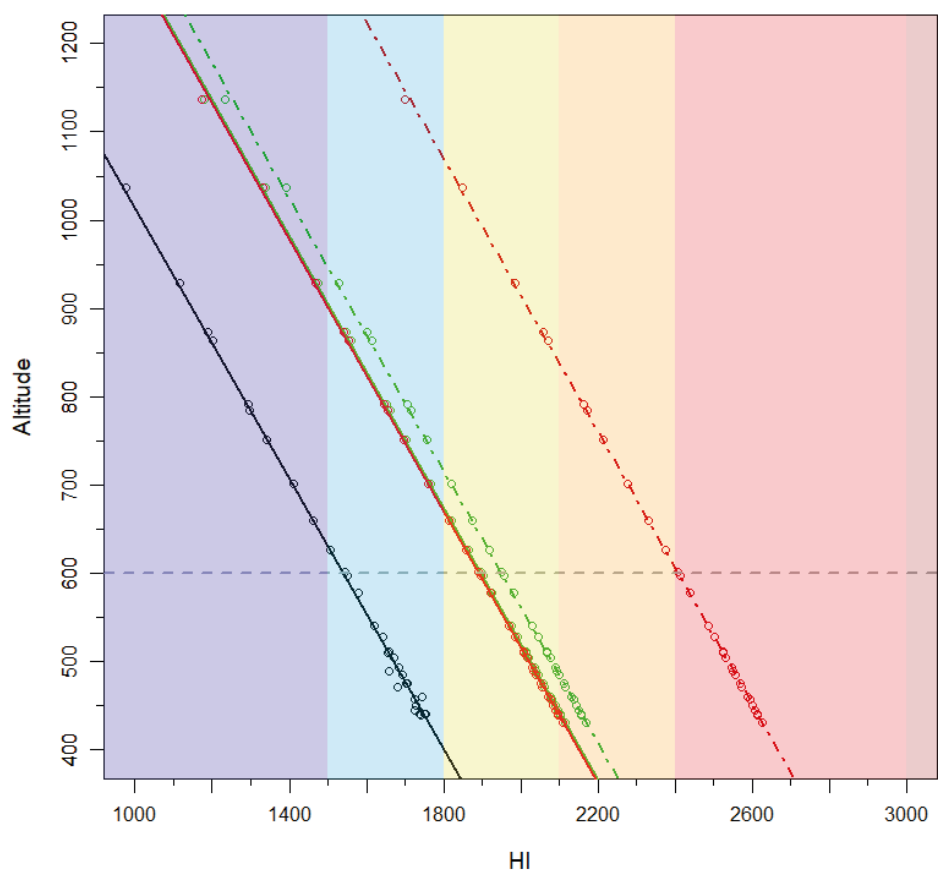
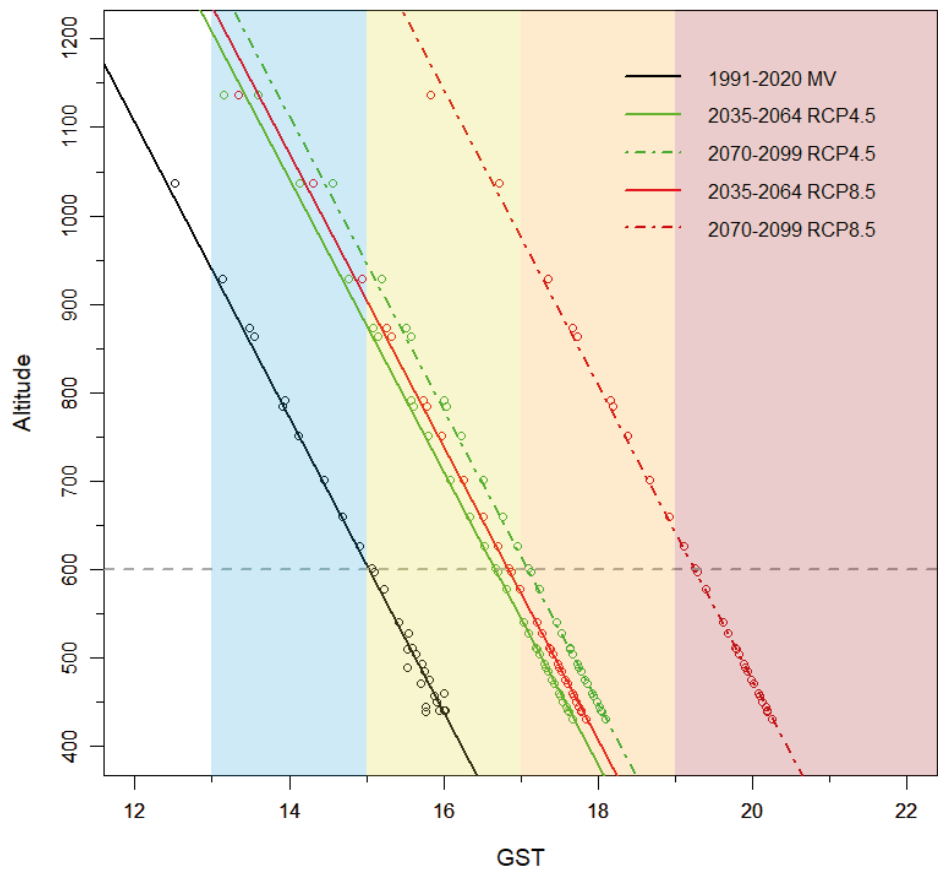


Figure 3.8. Average growing season temperature (GST) and Huglin’s heliothermal index (HI) as a function of altitude for three periods (1991–2020, 2034–2064 and 2070–2099) with RCP4.5 and RCP8.5. The dotted grey line indicates the current altitudinal limit of vineyards (600 m a.s.l.). The coloured bands correspond to the same classifications as shown in Figure 2. MV indicates measured values.

3.4. Discussion

Our analyses of observed and expected trends for the two bioclimatic indices HI and GST indicate that, regardless of which climate scenario unfolds, the vineyards of Neuchatel will face climatic conditions during the next decades that will require adaptation measures. Actually, GST is already reaching the upper limit for Pinot noir in the generic classification proposed by Jones (2006). Similarly, HI is already slightly above the optimum defined by Huglin and Schneider (1998) for this variety. Until mid-century (2035–2064), our results show relatively similar future climate prospects for RCP4.5 and RCP8.5. In contrast, our results indicate that towards the end of the century, vineyards in the current cultivation areas of Neuchatel would be characterised by a new climate under RCP8.5 only: hot and humid during the vegetation period with frequent extreme events. The Neuchatel vineyards will have to cope with longer and more intense periods of drought, as well as more frequent intense precipitation events.

To interpret our results, a probable underestimation of the current warming by the available model chains must be taken into account. We have underlined the gap observed between the measured data and those predicted with all RCMs of the CH2018 dataset with respect to the historical period 1970–2020, which is particularly evident for HI but also occurs for GST. For decades, temperatures have been consistently increasing more than expected by the latest IPCC reports, i.e., reality has regularly surpassed model predictions. Other authors have also shown that the increase in summer temperature is underestimated by most of these models. For example, Boé et al. (2020) and Schwingshackl et al. (2019) noted that most general circulation models (GCMs), as well as RCMs, tend to underestimate the real increase occurring in summer temperatures in Europe, especially in terms of daily maxima. It is, therefore, likely that the actual temperature trends will be steeper than those resulting from our analyses. In fact, our results show that only three model chains satisfactorily replicate actual temperature trends: SMHI-RCA4 ECEARTH EUR11, SMHI-RCA4 HADGEM EUR11, and SMHI-RCA4 CCCMA

EUR11. In terms of future warming, SMHI-RCA4 HADGEM EUR11 and SMHI-RCA4 CCCMA EUR11 are at the upper end of the range of future temperature projected by the ensemble of the CH2018 models, while SMHI-RCA4 ECEARTH EUR11 is more representative of the ensemble media.

Temperature is an extremely important parameter for vineyards, but other criteria also play a role in the production of high-quality wines, including soil characteristics, water availability (vine water status) and evapotranspiration. The response of vines and their ability to adapt to new environmental constraints (e.g., warming and drought) will depend to a large extent on the interactions between soil, climate and grape variety. Soil characteristics, particularly the capacity of the soil to function as a water reserve during the growing season and drought episodes, will be essential to ensure the growth, yield and quality of the grapes. The management of soil maintenance (e.g., type of grass cover and percentage of soil covered with grass) will play a key role in the consumption and availability of soil water reserves during the hot and dry parts of the season.

The risks of water and mineral competition between grasses and vines will become a major issue for winegrowers with increasing global warming. The cultivation techniques that mitigate these risks lie in the choice of plants (grape varieties and rootstocks) adapted to the characteristics of the terroir, in the reduction of leaf area, in the reduction of the grassy area between the rows of vines in case of drought, and in rational irrigation as a last resort. Wine growers will also have to take into account the fact that the advance in the phenological stages of the grape varieties traditionally grown in Neuchatel will have an impact on wine typicity even if the same varieties, such as Pinot noir, are still grown.

While adaptation solutions to climate change regarding cultural and vinification practices, such as drip irrigation, late winter pruning, and a reduced leaf-to-fruit ratio, could be used by wine growers in the short term, switching grape varieties and an altitudinal shift for the less thermophilic varieties are the main long-term solutions if scenarios such as RCP8.5 unfold. If it is theoretically possible to move part of a vineyard to a higher altitude, spring frost must also be taken into account, as moving farther away from the moderating effect of the lake involves a greater risk. This risk could be minimised by planting varieties with a later phenology. This solution is also limited in practice by the fact that around Neuchatel, most of

the land above 600 m a.s.l. is covered by protected forests or by other cropland, where the soils may not be suitable for viticulture.

3.5. Conclusions

Our analyses show that, with both the RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios, future climatic conditions will need adaptation measures for viticulture in the region of Neuchatel to continue, particularly if winegrowers intend to maintain present varieties, typically Pinot noir. Both bioclimatic indices applied here, i.e., GST and HI, suggest that the areas currently used for vine growing around Neuchatel will be more appropriate for grape varieties such as Merlot, Viognier, Cabernet Franc, Malbec and Syrah than for Pinot noir in the mid-century (2035–2064). However, although these temperature classes, developed by research and widely adopted for vine growing, have largely been proven valid, the temperature is not the only determining factor to be considered for the adaptability of grape varieties. Specifically, water availability will become a challenge in our study region, whereas it never was in the past, and thus, irrigation systems are not available. The implementation of adaptation measures, such as irrigation systems and agroforestry, should make it possible to maintain the production of high-quality Pinot noir. Still, the wine typicity will change, and this parameter will have to be taken into account in decisions concerning future customers' tastes.

For the second half of the century, our results show continuing significant increases in the bioclimatic indices with RCP8.5 but no significant increase in either index with RCP4.5. With RCP8.5, the climate at the end of the century is expected to be too hot for vine cultivation in the region of Neuchatel, even for southern grape varieties, meaning that adaptation for wine growers is expected to be very difficult. With RCP8.5, there would be a HI difference of 400 in just 30 years. This implies that changes in climate would be so fast that it would become increasingly complicated to choose which grape variety to grow.

Solutions to rapid climate warming, mainly moving part of the vineyards to higher altitudes, will have to be considered but will need to take into account various limits: increased risk of spring frost and the fact that most of the land above the current vineyard's altitudes is unsuitable for viticulture. Finally, the choice between vineyards and other cropland as the surfaces devoted to agriculture become smaller will potentially become increasingly difficult.

Acknowledgements

This research was funded by the Swiss Federal Office for Agriculture (pilot program 'Adaptation to climate change' coordinated by the Federal Office for the Environment), the canton of Neuchatel, winegrowing municipalities, and wine producers' associations. Part of the temperature data were provided by the National Centre for Climate Services, MeteoSwiss (Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology) and Agrometeo by Agroscope (Swiss Center of Excellence for Agricultural Research). The authors are grateful to Melissa Dawes for her useful comments and suggestions for improving the manuscript.

References

- Battaglini, A., Barbeau, G., Bindi, M., & Badeck, F.-W. (2009). European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation [journal article]. *Regional Environmental Change*, 9(2), 61-73. <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0053-9>
- Boé, J., Somot, S., Corre, L., & Nabat, P. (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Climate Dynamics*, 54(5), 2981-3002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>
- Bonfante, A., Alfieri, S., Albrizio, R., Basile, A., De Mascellis, R., Gambuti, A., Giorio, P., Langella, G., Manna, P., & Monaco, E. (2017). Evaluation of the effects of future climate change on grape quality through a physically based model application: a case study for the Aglianico grapevine in Campania region, Italy. *Agricultural Systems*, 152, 100-109.
- Bonfante, A., & Brillante, L. (2022). Terroir analysis and its complexity : This article is published in cooperation with Terclim 2022 (XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium), 3-8 July 2022, Bordeaux, France. *OENO One*, 56(2), 375-388. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5448>
- Bramley, R., Ouzman, J., & Boss, P. K. (2011). Variation in vine vigour, grape yield and vineyard soils and topography as indicators of variation in the chemical composition of grapes, wine and wine sensory attributes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 217-229.

Brillante, L., Mathieu, O., Lévêque, J., van Leeuwen, C., & Bois, B. (2018). Water status and must composition in grapevine cv. Chardonnay with different soils and topography and a mini meta-analysis of the $\delta^{13}\text{C}$ /water potentials correlation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2), 691-697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.8516>

CH2018. (2018). CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland - Technical Report.

Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., & Rebetez, M. (2022). Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 423-436. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>

Cook, B. I., & Wolkovich, E. M. (2016). Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *Nature Climate Change*, 6(7), 715-721. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nclimate2960>

De Orduna, R. M. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844-1855. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>

Dequin, S., Escudier, J.-L., Bely, M., Noble, J., Albertin, W., Masneuf-Pomarède, I., Marullo, P., Salmon, J.-M., & Sablayrolles, J. M. (2017). How to adapt winemaking practices to modified grape composition under climate change conditions. *OENO One*, 51(2), 205-214. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1584>

Doutreloup, S., Bois, B., Pohl, B., Zito, S., & Richard, Y. (2022). Climatic comparison between Belgium, Champagne, Alsace, Jura and Bourgogne for wine production using the regional model MAR. *OENO One*, 56(3), 1-17. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.3.5356>

Duchêne, E., & Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for sustainable development*, 25(1), 93-99. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00886271>

Fraga, H., de Cortázar Aauri, I. G., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2017). Viticulture in Portugal: A review of recent trends and climate change projections. *OENO One*, 51(2), 61-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1621>

- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2012). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2), 94-110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fes3.14>
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2012). Time of emergence of climate signals [<https://doi.org/10.1029/2011GL050087>]. *Geophysical Research Letters*, 39(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011GL050087>
- Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *C. R. Acad. Agric*, 1117-1126.
- Huglin, P., & Schneider, C. (1998). *Biologie et écologie de la vigne* (L. T. E. DOC, Ed. 2nd edition ed.). TecDoc.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-2391. doi:10.1017/9781009157896.001.
- Jones, G. (2007). *Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production* Climate and Viticulture Congress, Zarazoga, Spain.
- Jones, G. V. (2006). Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. *Fine Wine and Terroir: The Geoscience Perspective*(9), 1-14.
- Jones, G. V., Edwards, E. J., Bonada, M., Sadras, V. O., Krstic, M. P., & Herderich, M. J. (2022). 17 - Climate change and its consequences for viticulture. In A. G. Reynolds (Ed.), *Managing Wine Quality (Second Edition)* (pp. 727-778). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00015-4>
- Jones, G. V., & Webb, L. B. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research*, 21(2-3), 103-106. <https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530091>

Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality [journal article]. *Climatic Change*, 73(3), 319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>

Kliewer, W. M. (1977). Influence of Temperature, Solar Radiation and Nitrogen on Coloration and Composition of Emperor Grapes. *American journal of enology and viticulture*, 28(2), 96-103. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/28/2/96.full.pdf>

Laget, F., Tondut, J.-L., Deloire, A., & Kelly, M. T. (2008). Climate trends in a specific Mediterranean viticultural area between 1950 and 2006. *OENO One*, 42(3), 113-123. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/oeno-one.2008.42.3.817>

Lovisolò, C., Perrone, I., Hartung, W., & Schubert, A. (2008). An abscisic acid-related reduced transpiration promotes gradual embolism repair when grapevines are rehydrated after drought. *New Phytologist*, 180(3), 642-651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02592.x>

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1), 213. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

Molitor, D., & Junk, J. (2019). Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region. *OENO One*, 53(3), 409-422. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.3.2329>

Morales-Castilla, I., García de Cortázar-Atauri, I., Cook, B. I., Lacombe, T., Parker, A., van Leeuwen, C., Nicholas, K. A., & Wolkovich, E. M. (2020). Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(6), 2864-2869. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>

Moriondo, M., Jones, G. V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., & Bindi, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change [journal article]. *Climatic Change*, 119(3-4), 825-839. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0739-y>

Nesbitt, A., Dorling, S., Jones, R., Smith, D. K. E., Krumins, M., Gannon, K. E., Dorling, L., Johnson, Z., & Conway, D. (2022). Climate change projections for UK viticulture to 2040: a

focus on improving suitability for Pinot noir. *OENO One*, 56(3), 69-87.
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.3.5398>

OIV. (2012). OIV guidelines for vitiviniculture zoning methodologies on a soil and climate level (Resolution OIV-VITI 423-2012, Issue).

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.

Quénol, H., Le Roux, R., & Tissot, C. (2019). Adaptation de la viticulture au changement climatique: vers des scénarios à haute résolution in XXXIle Colloque International de l'AIC, Thessaloniki, Greece.

R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing [Computer software manual]. Vienna, Austria. In.

Raupach, T. H., Martius, O., Allen, J. T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K. L., Trapp, R. J., & Zhang, Q. (2021). The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3), 213-226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>

Rebetez, M., & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91(1-4), 27-34.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00704-007-0296-2>

Schultz, H. R. (2000). Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6(1), 2-12.

Schwingshackl, C., Davin, E. L., Hirschi, M., Sørland, S. L., Wartenburger, R., & Seneviratne, S. I. (2019). Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO₂ response. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114019.

Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N., Pagé, C., & van Leeuwen, C. (2018). The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>

- Spangenberg, J. E., & Zufferey, V. (2018). Changes in soil water availability in vineyards can be traced by the carbon and nitrogen isotope composition of dried wines. *Science of The Total Environment*, 635, 178-187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.078>
- Spayd, S. E., Tarara, J. M., Mee, D. L., & Ferguson, J. C. (2002). Separation of Sunlight and Temperature Effects on the Composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot Berries. *American journal of enology and viticulture*, 53(3), 171-182. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/53/3/171.full.pdf>
- Stock, M., Gerstengarbe, F. W., Kartschall, T., & Werner, P. C. (2005). Reliability of climate change impact assessments for viticulture.
- Tilloy, V., Cadiere, A., Ehsani, M., & Dequin, S. (2015). Reducing alcohol levels in wines through rational and evolutionary engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Food Microbiology*, 213(20), 49-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.027>
- Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1), 81-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>
- Unwin, T. (2005). *Wine and the vine: an historical geography of viticulture and the wine trade*. Routledge.
- van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 150-167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>
- van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51(2), 147-154. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1647>
- van Leeuwen, C., & Seguin, G. (2006). The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>
- van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3), 121-134. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>

Vitasse, Y., & Rebetez, M. (2018). Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Climatic Change*, 149(2), 233-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-018-2234-y>

Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>

Zufferey, V., Cochard, H., Ameglio, T., Spring, J.-L., & Viret, O. (2011). Diurnal cycles of embolism formation and repair in petioles of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Chasselas). *Journal of Experimental Botany*, 62(11), 3885-3894. <https://doi.org/10.1093/jxb/err081>

Zufferey, V., Gindro, K., Verdenal, T., Murisier, F., & Viret, O. (2022). La vigne. Anatomie et physiologie. nutrition, carences et accidents physiologiques.

Zufferey, V., Spring, J.-L., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., Koestel, C., Rösti, J., Gindro, K., Spangenberg, J., & Viret, O. (2017). The influence of water stress on plant hydraulics, gas exchange, berry composition and quality of Pinot Noir wines in Switzerland. *OENO One*, 51(1), 17-27. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.1.1314>

Zurbenko, I. G., & Smith, D. (2018). Kolmogorov–Zurbenko filters in spatiotemporal analysis. *WIREs Computational Statistics*, 10(1), e1419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wics.1419>

Supplementary Material

Table 3.3. Temperature loggers information

Name	Alt. m a.s.l.	Long. LV03	Lat. LV03	Type	Source	Data since	Tmax NA replaced	Tmin NA replaced
MMBOY	510	553199	200608	Tmin and Tmax (°C)	MS	2013	127 (8.48 %)	127 (8.48 %)
CHM	1136	565060	211006	Tmin and Tmax (°C)	MS	1984	0	0
CRM	431	571160	210800	Tmin and Tmax (°C)	MS	1992	190 (3.17 %)	193 (3.22 %)
NEU	485	563086	205559	Tmin and Tmax (°C)	MS	1874	0	0
CHP	490	540540	187685	Tmin and Tmax (°C)	AG	2006	156 (5.21 %)	257 (8.58 %)
CON	449	545910	189800	Tmin and Tmax (°C)	AG	2017	0	0
CRS	440	569703	211424	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	13 (0.47 %)	112 (4.03 %)
GOR	472	550709	195300	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	3 (0.11 %)	64 (2.30 %)
PRA	445	573722	200314	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	0	0
TWA	460	580110	217085	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	20 (0.72 %)	123 (4.42 %)
ST001	494	556889	203227	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST002	451	556780	202606	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST003	441	555152	200667	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST004	435	557587	203060	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST005	476	554953	199127	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST006	511	553533	201286	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST007	627	552986	202206	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST008	702	552655	202681	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST009	752	552257	203175	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST010	864	552143	203864	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST011	874	554903	206796	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST012	1037	552888	204729	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST013	785	554761	204936	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST014	660	554805	203626	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST015	597	556363	203887	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST016	578	557261	204039	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST017	528	557606	203628	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST018	791	556028	205090	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST019	929	554575	206781	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST020	540	561766	205592	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST021	476	567711	209604	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST022	540	565067	207640	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST023	601	570168	212257	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST024	504	569508	211666	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST025	457	553768	198004	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2020	0	0

Location, type, source, first complete year of data record, and number of missing values for each station.

4. Impacts potentiels d'insectes ravageurs dans le vignoble neuchâtelois sous l'effet des changements climatiques

Titre original : Climate change is likely to favour polyvoltine and invasive insect species, leading to more damage in the mid-latitude vineyards of Neuchatel

Valentin Comte^{*1,2}, Léonard Schneider^{1,2}, Baptiste Sneiders² and Martine Rebetez^{1,2}

¹University of Neuchatel, Institute of Geography, Neuchatel, Switzerland

²Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Neuchatel, Switzerland

*Corresponding authors: valentin.comte@unine.ch and leonard.schneider@unine.ch

Abstract

Climate change has major impacts on viticultural ecosystems worldwide, affecting wine production. Apart from direct impacts, the increase in temperature during the development season is likely to favour polyvoltine insect species, as well as invasive ones, leading to more damage in the vineyards. In this study, we examined the extent to which changes in mean temperature over the development season (March through September) can potentially increase the voltinism and change the phenology of pest species in the vineyard area of Neuchatel (Switzerland). We first analysed long-term daily mean temperature data from 1970 to 2022 at the meteorological station of Neuchatel. Then we used two climate scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) to analyse daily mean temperature during the period 2023–2099. For both of these periods, we computed the number of growing degree days (GDDs) above 10°C, as it is the base development temperature for many polyvoltine pest species. We then used specific bioclimatic models for two major pest species, namely the European grapevine moth (*Lobesia botrana*) and the American grapevine leafhopper (*Scaphoideus titanus*) to compare the current and future suitability of these two species to the air temperature conditions in Neuchatel. Our results show an increase of about 425 GDDs since 1970 (+85 GDDs per decade). According to our models, values will continue to rise during the next decades, with a trend ranging from +28 GDDs per decade (RCP4.5) to +100 GDDs per decade (RCP8.5). This could lead to additional generations of polyvoltine pest species. A third annual generation can be expected in one year out of four for the European grapevine moth by the middle of 21st century. While temperature conditions are currently moderately favourable for the American grapevine leafhopper, they are predicted to become highly favourable by the middle and the end of the century under both scenarios. These trends mean that climate change is likely to

increase pest damage risks in the vineyards of Neuchatel in the future. Pest regulation will remain crucial in limiting major impacts on wine production.

Keywords

climate change, development season, growing degree day, *Lobesia botrana*, *Scaphoideus titanus*, vine pest

4.1. Introduction

Climate change is a major issue for vine-growing, as grape vines are particularly sensitive to local climatic conditions (Jones, 2006; Jones & Davis, 2000; van Leeuwen et al., 2004). It has direct impacts on the plants and on the quality of wine, such as an increase in the sugar level and potential alcohol concentration of wines, a decrease in the total acidity of wines, and shifts in the phenological stages of grapes (Jones & Webb, 2010; Spayd et al., 2002). Extreme events, such as hailstorms, spring frost, heavy precipitation and heat waves, can reduce wine production. Climate change also impacts vine-growing indirectly by affecting vineyard ecosystems, e.g. the interactions between species. Insect pests are particularly important, as they can strongly reduce both the quantity and quality of grapes. All these impacts require climatic studies at the local scale in order to develop adaptation strategies in vineyard areas.

Climate change impacts the spatial distribution and activity of major vine pest insects (Boudon-Padieu & Maixner, 2007; Daane et al., 2018). As insects are ectothermic organisms, they are strongly sensitive to ambient temperature (Bale et al., 2002). In a temperate climate, it is likely that thermophile pest species will benefit from global warming (Schneider et al., 2023; Schneider et al., 2022). This includes polyvoltine species (i.e. species able to produce more than one generation per year; Altermatt (2010)), as well as invasive exotic species which are likely to spread poleward (Yan et al., 2017). A warmer development season is likely to increase voltinism and favour exotic species. This could lead to more damage in forests and crops, including vineyards. Therefore, it is crucial to study how temperature conditions during the development season are changing and to understand their potential impacts on pest populations.

In a temperate climate, an increase in voltinism is associated with both a warmer and a longer development season. Warmer springs induce an earlier start of the first generation and of

other phenological events (Forrest, 2016). Increase in voltinism, including in pest species, is associated with warmer conditions allowing them to complete additional cycles. An impact of climate change on voltinism has already been observed for some butterfly species across Europe since the 1980s (Altermatt, 2010). Additional generations have also been noticed for some pest species in Switzerland. For example, the spruce bark beetle (*Ips typographus*) has been able to produce three generations per year instead of two since the 2000s on the Swiss Plateau (Jakoby et al., 2022). Similarly, a second generation has been observed at least since 2018 for the marmorated stink bug (*Halyomorpha halys*; Stoeckli et al., 2020), as well as since the 2010s for the box tree moth (*Cydalima perspectalis*; Nacambo et al., 2014). Both of these species are invasive, originating from warmer climates. In general, it is expected that species from more southern regions will reach Switzerland during the next decades, benefitting from milder winters (Schneider et al., 2021; Vittoz et al., 2013) and warmer development seasons. The predicted increase in voltinism and spread of invasive species are therefore likely to lead to more damage, including in vineyards.

In this study, we focused on the potential impacts of climate change on insect pests in the vineyard region of Neuchatel (Switzerland). Based on the literature, we identified two major pest species which are threatening vines, and for which thermal requirements are known. The European grapevine moth (*Lobesia botrana*) is a polyvoltine species already observed in the region, while the American grapevine leafhopper (*Scaphoideus titanus*) is an invasive species currently spreading across south-western Switzerland.

a) European grapevine moth

The European grapevine moth originates from Southeastern Europe and has been widespread in European vineyards, including in Switzerland, since at least the beginning of the 20th century (Castex et al., 2020). This pest currently produces two generations per year in Neuchatel, and up to five generations per year in Spain (Gutierrez et al., 2018). Its base development temperature threshold (tb) was estimated at 10°C by Gutierrez et al. (2018), while Briere and Pracros (1998) estimated it at between 8°C and 12°C. The number of GDDs per generation has been estimated at 458 for tb = 10°C (Touzeau, 1981).

b) American grapevine leafhopper

The American grapevine leafhopper originates from North America and is considered as a major vineyard pest species, as it is the vector of the *flavescence dorée* disease (Linder et

al., 2016). This insect was first observed in France in 1960 (Bonfils & Schvester, 1960) and is now present in most of the major European wine countries (Chuche & Thiéry, 2014). In Switzerland, the American grapevine leafhopper has already been detected in Ticino (Baggiolini et al., 1968), in Valais (Sneiders et al., 2019), and in the Lake Geneva basin (Schaerer et al., 2007).

The aim of this study was to determine the extent to which changes in the mean temperature during the development season could impact pest species in the vineyard region of Neuchatel. We first analysed trends in GDDs with $t_b = 10^{\circ}\text{C}$, as this is the base development temperature for European grapevine moth and other polyvoltine pest species (Schneider et al., 2023). We used temperature data over the last 50 years (1970–2022) and two Representative Concentration Pathway (RCP4.5, RCP8.5) scenarios for the future (2023–2099). We then used specific bioclimatic models for the European grapevine moth and the American grapevine leafhopper to compare the current and future suitability of these two species to the temperature conditions in Neuchatel.

4.2. Materials and methods

4.2.1. Study area

The study area was the vineyard region in the canton of Neuchatel, Switzerland (Figure 4.1). The vineyards are located along the edge of Lake Neuchatel, from 430 to 580 m a.s.l (Figure 4.1). The main cultivated grape varieties are Pinot noir (presently 55%) and Chasselas (27%). Due to climate change, the vine climate of the region has already warmed from cool to temperate (Comte et al., 2022; Comte et al., 2023).

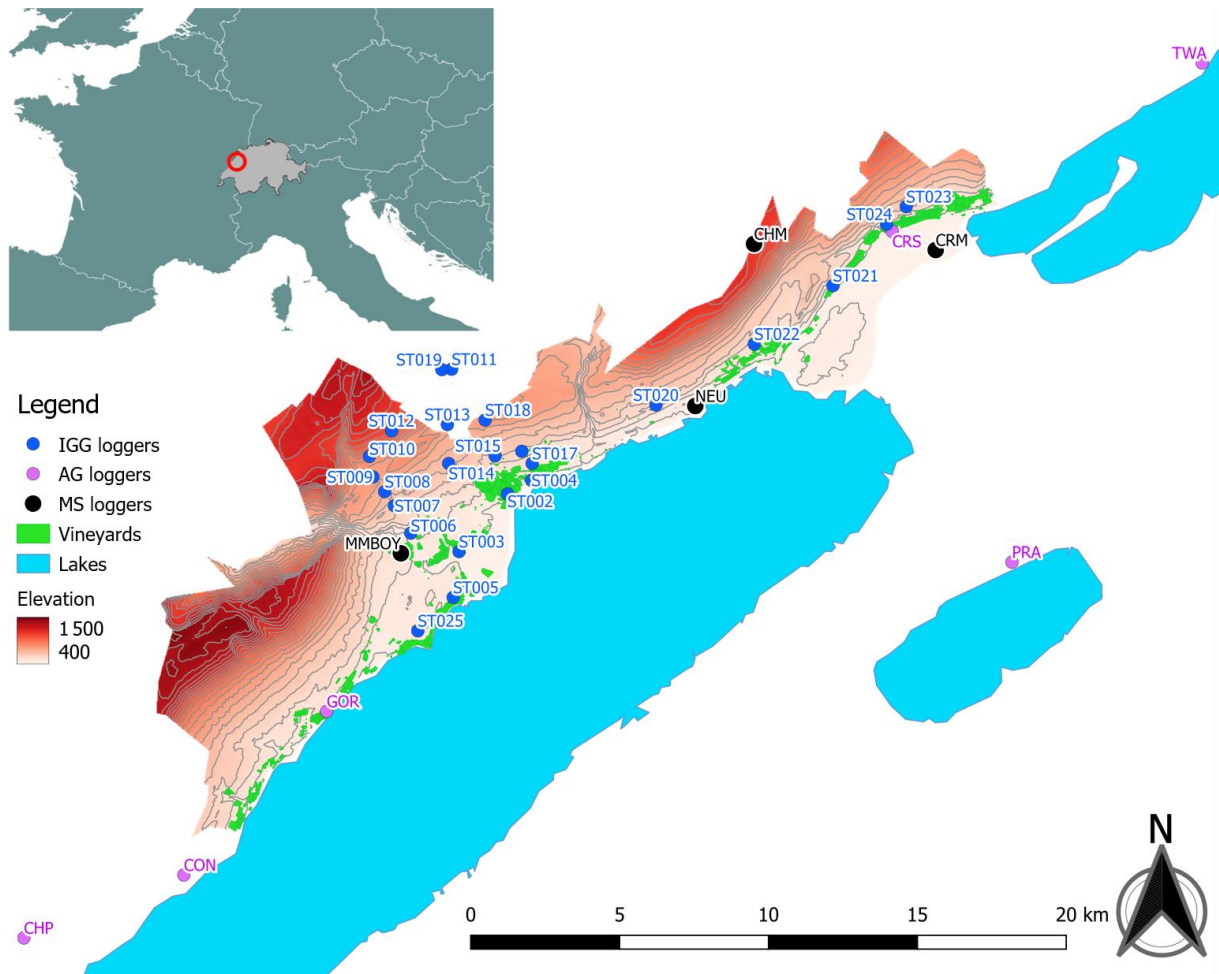


Figure 4.1 Locations of the Neuchâtel vineyards considered in this study and of the air temperature loggers. IGG loggers are our own, AG are Agroscope loggers, and MS are MeteoSwiss loggers.

4.2.2. Data

We used data from MeteoSwiss (<http://gate.meteoswiss.ch>) for the past and present period (1980–2020), including homogenised data from the NEU station. This station is located in a grass and trees covered area at an elevation corresponding to the Neuchâtel vineyards (485 m a.s.l.) and is therefore representative of the climatic conditions of the vineyards in the area. For the future simulations, we used data for the NEU station from the CH2018 programme (CH2018, 2018) and from two Representative Concentration Pathways (RCP4.5, RCP8.5). We selected data from the regional climate mode (RCM) *SMHI-RCA4-ECEARTH*, which is driven by the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) in the Euro-CORDEX project. This data has been derived locally at Swiss level by the National Center for Climate Services (NCCS). It is provided from the DAILY LOCAL data of the CH2018 dataset (CH2018, 2018). Data

was emulated from measured data and with climatic simulations from RCP4.5 and RCP8.5. The data of this RCM fit well with the historical data for the NEU station and the trends in various bioclimatic indices computed for the NEU station are near the average trends of all the 18 other RCMs available in the CH2018 dataset (Comte et al., 2023).

To produce bioclimatic maps, we used data from 35 stations originating from MeteoSwiss (MS, 4), Agrometeo (AG, 6) and our own loggers (IGG, 25) in the region (Table 4).

4.2.3. Methods

We based our analysis on daily mean temperature values (T_{mean}), defined as the mean of daily minimum and maximum temperature. We computed growing degree days (GDDs) using a threshold (t_b) relevant for the development of the European grapevine moth: $GDD = \text{daily } T_{mean} \text{ minus } t_b$ (in °C), where $GDD = 0$ when $T_{mean} \leq t_b$. We summed the GDD values over the year to compute annual GDDs (Tschurr et al., 2020). We determined linear trends for past and future periods (1970–2022 and 2023–2099). We also used 11-year moving averages.

We used a delta-method similar to the method used by Sneiders et al. (2019) to compute simulated air temperatures for each hour of the day of the RCM. This method was adapted from Gago Da Silva et al. (2012). It is based on high-resolution RCM model output and meteorological observations of the studied area and can be summarised as follows:

$$V = V_{obs} + \Delta$$

with

$$\Delta = (V_{sim,2} - V_{sim,1}) \times f_I + b$$

$V_{sim,2}$ corresponds to the perturbation in the future variable as predicted by the RCM model, $V_{sim,1}$ is the current variable simulated by this same f_I model for a given climate scenario, f_I is a correction factor for global warming, and b corresponds to the noise. V , V_{obs} and V_{sim} are surface variables (temperatures in the context of this work) in a space–time function (Gago Da Silva et al., 2012).

Modelling the development of American grapevine leafhopper

We calculated the American grapevine leafhopper’s developmental degree days (DD) using the emulated hourly temperatures described above, and we estimated the development of this species according to the methodology described by Sneiders et al. (2019). We calculated DDs on the basis of hourly temperatures (Bloesch & De Siebenthal, 1988). We added a lethal

temperature $T_{let} \geq 40^{\circ}\text{C}$ to these DDs. A 3-hour exposure to temperatures above 40°C is expected to kill 50% of adults and larvae (Rigamonti et al., 2011), whereas a six-hour exposure to temperatures above 28°C is expected to kill 50% of eggs (Rigamonti et al., 2014). Fecundity is expressed as the number of potential eggs O and is a function of the daytime temperature from 08.00 to 18.00 T_{fec} based on data from (Rigamonti et al., 2017). A maximum egg production of 40 at 21° and 22°C is given by the equation:

$$O = -0,7019 \times T_{fec}^2 + 30,2693 \times T_{fec} - 276,1067$$

We cross-referenced the emulated temperatures with information from the American grapevine leafhopper development models in Sneiders et al. (2019). We used this information to determine the potential number of eggs per female, defining three thresholds: not adapted = median number of eggs per female ≤ 10 ; adapted = median number of eggs per female between 10 and 40; and highly adapted = median number of eggs per female ≥ 40 .

GDD maps

We used the adiabatic lapse rate per month to downscale the temperature data from the MeteoSwiss weather station of Neuchatel to a high-resolution digital elevation model, using the method described by Comte et al. (2022). The lapse rates explain 0.97% of the temperature variation along the edge of Lake Neuchatel, according to Comte et al. (2022).

4.3. Results

4.3.1. GDDs ($t_b = 10^{\circ}\text{C}$) in Neuchatel vineyards

The average GDDs for the vegetation period in Neuchatel has increased by 84.9 per decade since 1970. For future periods (the present to the end of the 21st century), average GDDs for the vegetation period are predicted to increase by 27.7 (± 8.6) for RCP4.5 and by 100.4 (± 7.9) for RCP8.5.

For the last decades (1991–2020), the vine-cultivated area has ranged from 1300 GDDs at the edge of the lake to 1100 GDDs at the highest elevation of the vineyards (Figure 4.2a and 4.2b).

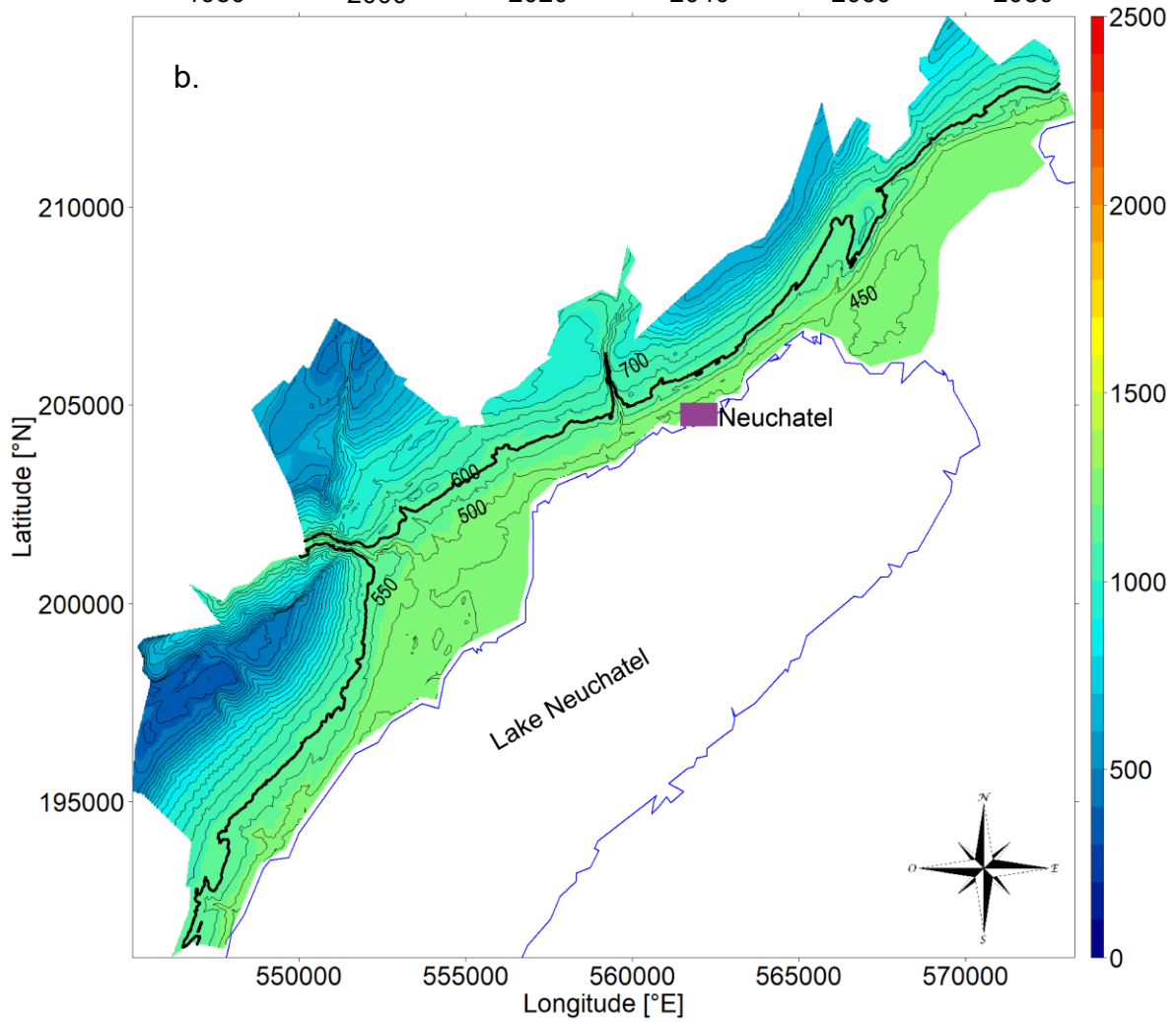
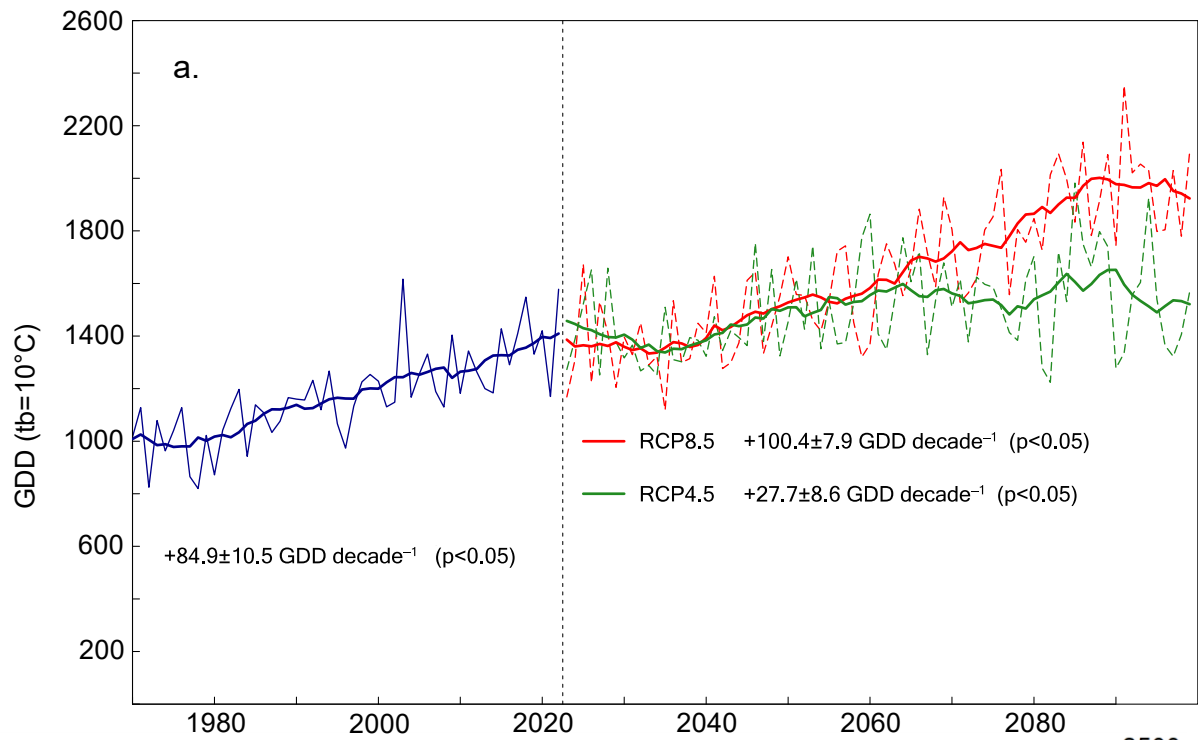


Figure 4.2 Growing degree days (GDDs; base development temperature threshold [tb] = 10°C) at the MeteoSwiss climate station NEU for the past decades and for projections with Representative Concentration Pathway RCP4.5 and RCP8.5 (a). Annual GDDs measured (1970–2022, thin solid lines) and simulated under RCP4.5 and RCP8.5 (2023–2099, dashed lines). Eleven-year moving averages are shown as thick solid lines, and slopes (\pm SE) of the linear regressions are displayed. Average spatial distribution of GDDs (tb = 10°C) for 1991–2020 (b). The bold black line in (b) indicates the current elevational limit of the vineyards (600 m a.s.l.).

No significant difference in average GDDs for the vegetation period (April through September) is visible between RCP4.5 and RCP8.5 for the 2035–2064 period (Figure 4.2a and Figure 4.3). The vine-cultivated area (430 m to 580 m a.s.l.) is predicted to experience between 1450–1650 GDDs (RCP4.5) and 1500–1700 GDDs (RCP8.5) in this period (Figure 4.3). There is also no significant difference in average vegetation period GDDs visible between 2035–2064 and 2070–2099 (range 1550–1750) with RCP4.5 (Figure 4.3). The difference between RCP4.5 and RCP8.5 is more pronounced for the period 2070–2099. With RCP8.5, the vine-cultivated area will experience between 1900 and 2100 GDDs at the end of the century (Figure 4.3).

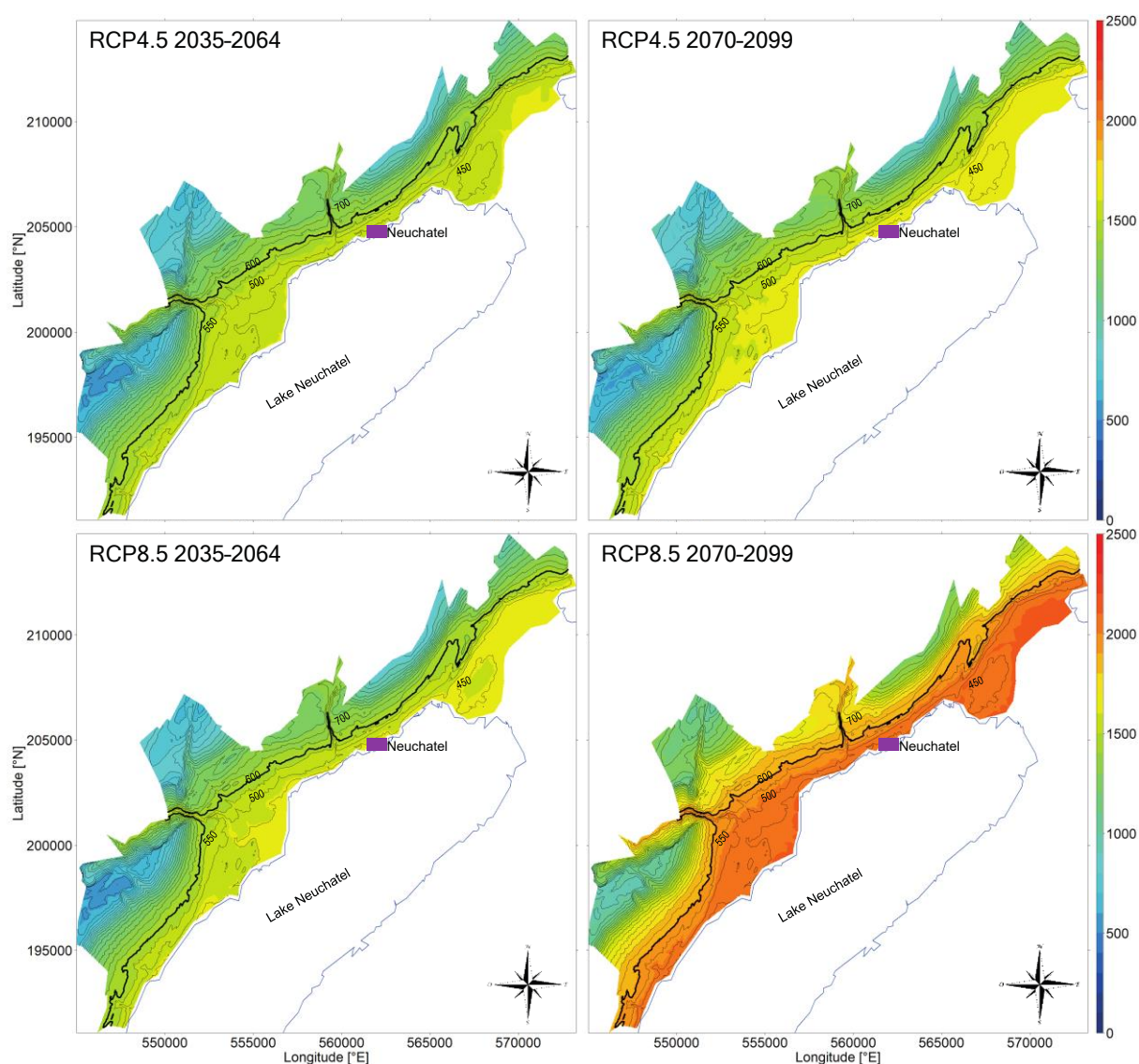


Figure 4.3. Trends in growing degree days (GDDs; base development temperature threshold [tb] = 10°C) for the periods 2035–2064 and 2070–2099 with RCP4.5 and RCP8.5. The bold black line indicates the current elevational limit of the vineyards (600 m a.s.l.).

4.3.2. Climatic acclimatation of the European grapevine moth in Neuchâtel vineyards

While climatic conditions were not suitable for a third generation of the European grapevine moth during the last 30 years, our results show that they will become so for about one year out of four by the middle of the 21st century, with both RCP4.5 and RCP8.5 (Table 4.1). By the end of the century, this value could reach 40% of the years with scenario RCP8.5, while it is not predicted to significantly change with RCP4.5 (Table 4.1).

Table 4.1. Frequency of third-generation outbreaks of European grapevine moths in the different periods.

Frequency of third-generation outbreaks (50% of flight)				
1991–2020	2035–2064		2070–2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
0%	23%	29%	27%	40%

For the last decades (1991–2020), the mean start dates of first- and second-generation European grapevine moths have been close to 2 May and 7 July, respectively (Table 4.2). No large changes were observed for the mean start date of European grapevine moth generations for future periods with either RCP4.5 or RCP8.5 (Table 4.2).

In the future, the mean date when a third generation could start will be close to 12 August with both scenarios RCP4.5 and RCP8.5 (Table 4.2).

Table 4.2. Mean date of generation start for the European grapevine moth in the different periods.

Mean date of generation start (10% of flight) [DOY]					
Generation	1991–2020	2035–2064		2070–2099	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
G1	122	125	119	122	125
G2	188	185	180	182	179
G3	-	223	225	222	226

4.3.3. Climatic acclimatation of the American grapevine leafhopper in Neuchatel vineyards

The median number of eggs laid by an American grapevine leafhopper female per year has been, on average and median, approximately 26 eggs for the period 1991–2020 (Figure 4.4). The potential number of eggs per female is clearly expected to increase in the coming decades (Figure 4.4). For the future (mid and end of the century), our model predicts that the average and median number of eggs per female per year will be above 40, with both scenarios RCP4.5 and RCP8.5 (Figure 4.4). Interannual variability is expected to decrease slightly for both scenarios during the future, relative to the recent past (1991–2020). An estimated 95% of the years will have more than 30 eggs per female per year with both scenarios RCP4.5 and RCP8.5 (Figure 4.4).

According to both scenarios, climatic conditions will be optimal for the American grapevine leafhopper by the middle, as well as by the end, of the 21st century.

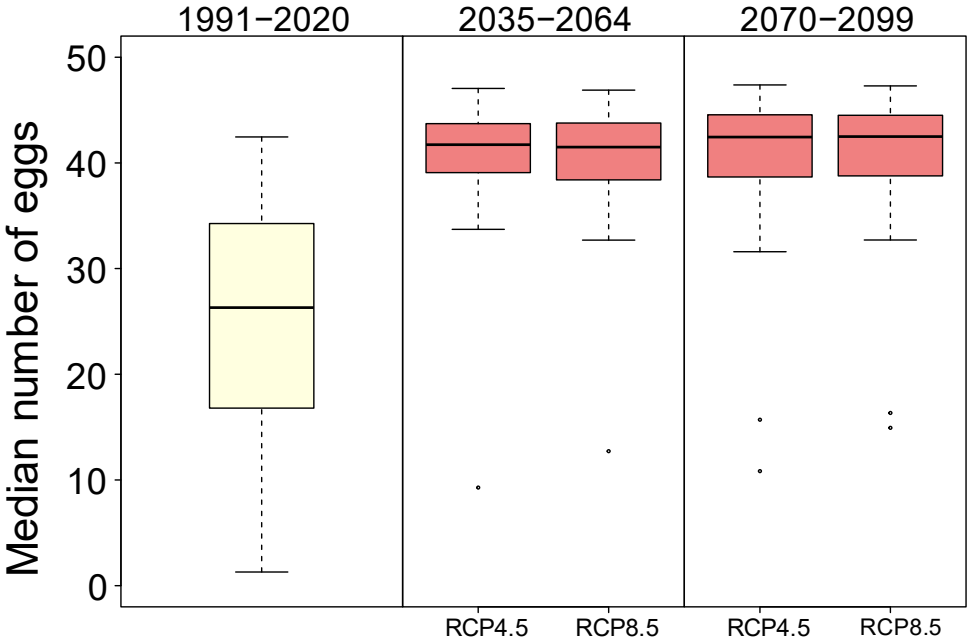


Figure 4.4. Median number of eggs per female and per year for three periods (1991–2020, 2035–2064 and 2070–2099) with RCP4.5 and RCP8.5 for future periods. Boxplot showing the minimum, the maximum, the sample median, and the first and third quartiles.

The mean date of the first outbreak is expected to occur by the end of June under current climatic conditions (1991–2020). Our results show that this date will shift to the middle of June by the middle and by end of the 21st century with both scenarios RCP4.5 and RCP8.5 (Table 3). Interannual variability is predicted to decrease slightly with both scenarios during the first half of the 21st century and to increase again later (Table 3).

Table 4.3. The mean date of the first outbreak by the American grapevine leafhopper. SE = standard error.

Mean date of first outbreak [DOY]				
1991–2020	2035–2064		2070–2099	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
179	165	165	161	161
SE=8.06	SE=7.21	SE=7.10	SE=8.78	SE=8.70

4.4. Discussion

Our results show that GDDs increased significantly in Neuchatel over the last 5 decades, by approximately 425. By the middle of the 21st century, the mean number of GDDs during the

development period is expected to exceed 1500 in both scenarios. This corresponds approximately to the conditions found in Ticino (southern side of the Alps) during the period 1980–2021 (Schneider, 2023). By the end of the century, the mean number of GDDs could reach 2000 GDDs in scenario RCP8.5, which is more than what we currently find anywhere in Switzerland. In scenario RCP4.5, GDDs would remain stable between the middle and end of the century, which corresponds to the current conditions in Ticino at lower elevations.

The increase in GDDs during the development season implies that polyvoltine species are likely to produce additional annual generations during the next decades. Our analysis concerning the European grapevine moth shows that a third generation can be expected to occur one year out of four by the middle of the century. The potential damage caused by this additional generation partly depends on the harvest period. As the harvest period is predicted to occur increasingly early in the year, it is likely that the third generation will break out after the harvest and therefore will not affect the grapes.

The values simulated by both scenarios for the coming decades show a slight decline compared with the values measured during the last decades, with the present values reached again around 2050. This might illustrate an underestimation of temperature forcing by the regional model. In this case, all our results should be interpreted with an offset of approximately 30 years. The next model generation should be available within a few years and should provide insight on this point.

While mean temperature during the development season has a major impact on voltinism, the population size of a species can be reduced by pest control activities. European grapevine moth can be efficiently controlled using mating disruption (Ioriatti et al., 2011). This means that additional generations will not necessarily lead to more damage in the vineyards. An increase in CO₂ concentrations may impact the efficiency of mating disruption techniques for some pest species (Choi et al., 2018), but this process is not expected to have an impact on European grapevine moth control, according to Becker et al. (2023). By contrast, there is currently no efficient way to control populations of the American grapevine leafhopper. The spread of this pest in the region of Neuchatel would therefore mean a major and increasing risk for the vineyards, as our results show that climatic conditions will become highly favourable for this species.

The number of American grapevine leafhopper eggs per female is highly dependent on air temperatures. Our results for this insect pest indicate that the climate over the coming

decades will become highly favourable for this insect, with no significant difference between the two RCP scenarios (Figure 3 and Table 3), although the simulated mean annual GDDs for the period 2070–2099 are significantly higher with RCP8.5 than with RCP4.5 (Figure 2). This result can be explained at least in part by the fact that American grapevine leafhopper has a relatively wide range, and is well adapted to climate conditions which are quite diverse in terms of temperature (Chuche & Thiéry, 2014). The optimum air temperature for this insect's development (number of eggs per female) is 21–22°C, and decreases progressively up to 30°C. Air temperatures exceeding 30°C have a negative impact on the number of eggs per female. The number of days with a maximum air temperature above 40°C, which can be lethal for the insect, remains limited in the Neuchatel vineyard region with simulated data for the period 2070–2099, which suggests that the species will not be negatively impacted by extreme hot air temperature. These results match those of Sneiders et al. (2019), where only the Ticino region in Switzerland is predicted to become slightly too warm for the American grapevine leafhopper by the end of the century with RCP8.5. If our simulation with RCP8.5 were extended to the 22nd century, it would probably show a decrease in American grapevine leafhopper eggs per female due to higher daily air temperature maxima.

Limitations of the study

Our study focused on mean temperatures during the development season, as they have a major influence on polyvoltine and invasive species. However, population dynamics are complex to model, and other climatic and non-climatic factors could be considered. In particular, minimum temperatures during winter have a major impact on the overwintering of pest species which are sensitive to cold events (Schneider et al., 2021). Extreme high temperature are also likely to limit the spread of pest species, such as the European grapevine moth, during the development season (Iltis et al., 2018). Precipitation could also be considered, as it impacts specific species, such as the spotted wing drosophila (*Drosophila suzukii*; (Rossini et al., 2020). Finally, the population size of a species is also driven by various non-climatic factors, such as predators, parasitoids, and pest control activities by humans.

4.5. Conclusions

Our analyses shows that the number of GDDs above temperature values offering favourable conditions to insect pest species ($t_b = 10^\circ\text{C}$) has been increasing in Neuchatel over the last 50

years, by +85 GDDs per decade. By the middle of the 21st century, the number of GDDs is predicted continue to increase and reach conditions currently observed at lower elevations in Ticino, according to both scenarios RCP4.5 and RCP8.5. The number of GDDs is predicted to then remain relatively stable until the end of the century according to RCP4.5, while continuing to increase by +100 GDDs per decade according to RCP8.5.

These results suggest that polyvoltine species, such as the European grapevine moth, are likely to produce additional generations in the next decades compared with under the present conditions. The bioclimatic model we used confirms that temperature conditions would allow a third annual generation for the European grapevine moth one year out of four by the middle of the century, instead of the two generations observed until now. Furthermore, the increase in mean temperatures during the development season are likely to favour invasive species coming from warmer climates. Based on our bioclimatic model, temperatures during the development season will become more favourable for the American grapevine leafhopper in the next decades, according to both scenarios. These trends underline the importance of pest control as a component of the adaptation strategies for the vineyards in the context of climate change.

Acknowledgements

This research was funded by the Swiss Federal Office for Agriculture (pilot programme 'Adaptation to climate change' coordinated by the Federal Office for the Environment), the canton of Neuchatel, winegrowing municipalities, wine producers' associations, and the University of Neuchatel. Some of the temperature data was provided by the National Centre for Climate Services, MeteoSwiss (Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology), and Agrometeo by Agroscope (Swiss centre of excellence for agricultural research). The authors are grateful to Melissa Dawes for useful comments and suggestions for improving the manuscript.

References

Altermatt, F. (2010). Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1685), 1281-1287.

Baggiolini, M., Canevascini, V., Caccia, R., Tencalla, Y., & Sobrio, G. (1968). Présence dans le vignoble du Tessin d'une cicadelle néarctique nouvelle pour la Suisse, *Scaphoideus littoralis* Ball. (Hom., Jassi-dae), vecteur possible de la flavescence dorée. In: *Mitteilungen der*

Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft, Vol. LV (3 and 4), 270-275.

Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J. C., Farrar, J., Good, J. E. G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T. H., Lindroth, R. L., Press, M. C., Symrnioudis, I., Watt, A. D., & Whittaker, J. B. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1), 1-16.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x>

Becker, C., Rummel, A., Gallinger, J., Gross, J., & Reineke, A. (2023). Mating still disrupted: Future elevated CO₂ concentrations are likely to not interfere with *Lobesia botrana* and *Eupoecilia ambiguella* mating disruption in vineyards in the near future. *OENO One*, 57(1), 245-252. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.7276>

Bloesch, B., & De Siebenthal, J. (1988). La température en tant que moyen de prévision et d'avertissement dans la lutte contre les insectes. *Revue suisse de viticulture, arboriculture, horticulture*, 20(2), 121-126.

Bonfils, J., & Schvester, D. (1960). Les cicadelles (Homoptera Auchenorrhyncha) dans leurs rapport avec la vigne dans le Sud-Ouest de la France. *Annales des Epiphyties*, 11(3), 325-336.

Boudon-Padieu, E., & Maixner, M. (2007). Potential effects of climate change on distribution and activity of insect vectors of grapevine pathogens. Colloque international et pluridisciplinaire sous l'égide de la chaire UNESCO Vin et Culture, Dijon,

Briere, J.-F., & Pracros, P. (1998). Comparison of temperature-dependent growth models with the development of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 27(1), 94-101.

Castex, V., de Cortázar-Atauri, I. G., Calanca, P., Beniston, M., & Moreau, J. (2020). Assembling and testing a generic phenological model to predict *Lobesia botrana* voltinism for impact studies. *Ecological Modelling*, 420, 108946.

CH2018. (2018). CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland - Technical Report.

Choi, K. S., Ahn, S.-J., Kim, S. B., Ahn, J. J., Jung, B. N., Go, S. W., & Kim, D.-S. (2018). Elevated CO₂ may alter pheromonal communication in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Physiological Entomology*, 43(3), 169-179.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/phen.12239>

Chuche, J., & Thiéry, D. (2014). Biology and ecology of the Flavescence dorée vector *Scaphoideus titanus*: a review. *Agronomy for sustainable development*, 34(2), 381-403.

Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., & Rebetez, M. (2022). Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 423-436. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>

Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., Zufferey, V., & Rebetez, M. (2023). Future climatic conditions may threaten adaptation capacities for vineyards along Lake Neuchâtel, Switzerland. *OENO One*, 57(2), 85-100. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7194>

Daane, K. M., Vincent, C., Isaacs, R., & Ioriatti, C. (2018). Entomological opportunities and challenges for sustainable viticulture in a global market. *Annual review of entomology*, 63, 193-214.

Forrest, J. R. (2016). Complex responses of insect phenology to climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 17, 49-54.

Gago Da Silva, A., Gunderson, I., Goyette, S., & Lehmann, A. (2012). Delta-method applied to the temperature and precipitation time series-An example.

Gutierrez, A. P., Ponti, L., Gilioli, G., & Baumgärtner, J. (2018). Climate warming effects on grape and grapevine moth (*Lobesia botrana*) in the Palearctic region. *Agricultural and Forest Entomology*, 20(2), 255-271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/afe.12256>

Iltis, C., Martel, G., Thiéry, D., Moreau, J., & Louâpre, P. (2018). When warmer means weaker: high temperatures reduce behavioural and immune defences of the larvae of a major grapevine pest. *Journal of Pest Science*, 91(4), 1315-1326. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0992-y>

Ioriatti, C., Anfora, G., Tasin, M., De Cristofaro, A., Witzgall, P., & Lucchi, A. (2011). Chemical Ecology and Management of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 104(4), 1125-1137. <https://doi.org/10.1603/ec10443>

Jakoby, O., Stadelmann, G., Lischke, H., & Wermelinger, B. (2022). 3.9 Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. *Wald im Klimawandel: Grundlagen für Adaptationsstrategien*, 247.

Jones, G. V. (2006). Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. *Fine Wine and Terroir: The Geoscience Perspective*(9), 1-14.

Jones, G. V., & Davis, R. E. (2000). Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *American journal of enology and viticulture*, 51(3), 249-261. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/51/3/249.full.pdf>

Jones, G. V., & Webb, L. B. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research*, 21(2-3), 103-106.
<https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530091>

Linder, C., Kehrl, P., & Viret, O. (2016). *La Vigne. Volume 2, Ravageurs et Auxiliaires* (Éditions Lavoisier ed., Vol. 2). AMTRA.

Nacambo, S., Leuthardt, F. L., Wan, H., Li, H., Haye, T., Baur, B., Weiss, R. M., & Kenis, M. (2014). Development characteristics of the box-tree moth *Cydalima perspectalis* and its potential distribution in Europe. *Journal of Applied Entomology*, 138(1-2), 14-26.

Rigamonti, I. E., Girgenti, P., & Jermini, M. (2017, 18-20.08.2017). Longevity and reproductive profile of *Scaphoideus titanus* Ball adults reared under controlled conditions. Proceedings of Meeting of the IOBC-WPRS Working Group "Integrated protection in viticulture", Riva del Garda.

Rigamonti, I. E., Jermini, M., Fuog, D., & Baumgärtner, J. (2011). Towards an improved understanding of the dynamics of vineyard-infesting *Scaphoideus titanus* leafhopper populations for better timing of management activities. *Pest Management Science*, 67(10), 1222-1229.

Rigamonti, I. E., Trivellone, V., Jermini, M., Fuog, D., & Baumgärtner, J. (2014). Multiannual infestation patterns of grapevine plant inhabiting *Scaphoideus titanus* (Hemiptera: Cicadellidae) leafhoppers. *The Canadian Entomologist*, 146(1), 67-79.

Rossini, L., Contarini, M., Giarruzzo, F., Assennato, M., & Speranza, S. (2020). Modelling *Drosophila suzukii* Adult Male Populations: A Physiologically Based Approach with Validation. *Insects*, 11(11), 751. <https://www.mdpi.com/2075-4450/11/11/751>

Schaerer, S., Johnston, H., Gugerli, P., Linder, C., Shaub, L., & Colombi, L. (2007). "Flavescence dorée" in Switzerland: spread of the disease in canton of Ticino and of its insect vector, now also in cantons of Vaud and Geneva. *Bulletin of Insectology*, 60(2), 375-376.

Schneider, L., Comte, V., & Rebetez, M. (2021). Increasingly favourable winter temperature conditions for major crop and forest insect pest species in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298, 108315.

Schneider, L., Comte, V., & Rebetez, M. (2023). Temperatures during the development season are increasingly favourable for polyvoltine pest species in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 338, 109503.

Schneider, L., Rebetez, M., & Rasmann, S. (2022). The effect of climate change on invasive

crop pests across biomes. *Current Opinion in Insect Science*, 100895.

Sneiders, B., Fleury, D., Goyette, S., & Jermini, M. (2019). Influence du réchauffement climatique sur la dynamique des populations de *Scaphoideus titanus* en Romandie. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 51(5), 276-286.

Spayd, S. E., Tarara, J. M., Mee, D. L., & Ferguson, J. C. (2002). Separation of Sunlight and Temperature Effects on the Composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot Berries. *American journal of enology and viticulture*, 53(3), 171-182.
<https://www.ajevonline.org/content/ajev/53/3/171.full.pdf>

Stoeckli, S., Felber, R., & Haye, T. (2020). Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology*, 64, 2019-2032.

Touzeau, J. (1981). Modélisation de l'évolution de l'Eudémis de la Vigne pour la région Midi Pyrénées. *Bollettino di zoologia agraria e di bachicoltura*, Ser. II(16), 26-28.

Tschurr, F., Feigenwinter, I., Fischer, A. M., & Kotlarski, S. (2020). Climate scenarios and agricultural indices: a case study for Switzerland. *Atmosphere*, 11(5), 535.

van Leeuwen, C., Friant, P., Choné, X., Tregoat, O., Koundouras, S., & Dubourdieu, D. (2004). Influence of climate, soil, and cultivar on Terroir. *American journal of enology and viticulture*, 55, 207-217.

Vittoz, P., Cherix, D., Gonthier, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., & Zumbach, S. (2013). Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. *Journal for Nature Conservation*, 21(3), 154-162.

Yan, Y., Wang, Y.-C., Feng, C.-C., Wan, P.-H. M., & Chang, K. T.-T. (2017). Potential distributional changes of invasive crop pest species associated with global climate change. *Applied geography*, 82, 83-92.

Supplementary Material

Table 4.4. Location, type, source, first complete year of data record, and number of missing values for each climate station used in the study.

Name	Elevation m a.s.l.	Long. LV03	Lat. LV03	Type	Source	Data since	Tmax NA replaced	Tmin NA replaced
MMB OY	510	553199	200608	Tmin and Tmax (°C)	MS	2013	127 (8.48%)	127 (8.48%)

CHM	1136	565060	211006	Tmin and Tmax (°C)	MS	1984	0	0
CRM	431	571160	210800	Tmin and Tmax (°C)	MS	1992	190 (3.17%)	193 (3.22%)
NEU	485	563086	205559	Tmin and Tmax (°C)	MS	1874	0	0
CHP	490	540540	187685	Tmin and Tmax (°C)	AG	2006	156 (5.21%)	257 (8.58%)
CON	449	545910	189800	Tmin and Tmax (°C)	AG	2017	0	0
CRS	440	569703	211424	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	13 (0.47%)	112 (4.03%)
GOR	472	550709	195300	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	3 (0.11%)	64 (2.30%)
PRA	445	573722	200314	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	0	0
TWA	460	580110	217085	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	20 (0.72%)	123 (4.42%)
ST001	494	556889	203227	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST002	451	556780	202606	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST003	441	555152	200667	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST004	435	557587	203060	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST005	476	554953	199127	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST006	511	553533	201286	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST007	627	552986	202206	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST008	702	552655	202681	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST009	752	552257	203175	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST010	864	552143	203864	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST011	874	554903	206796	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST012	1037	552888	204729	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST013	785	554761	204936	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST014	660	554805	203626	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST015	597	556363	203887	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST016	578	557261	204039	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST017	528	557606	203628	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST018	791	556028	205090	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST019	929	554575	206781	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST020	540	561766	205592	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST021	476	567711	209604	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST022	540	565067	207640	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST023	601	570168	212257	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST024	504	569508	211666	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST025	457	553768	198004	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2020	0	0

5. Discussion générale

5.1. Interprétation des résultats et perspectives de recherche

Nos résultats indiquent que les changements climatiques impactent le vignoble neuchâtelois et qu'ils continueront de l'impacter dans les prochaines décennies (Figures 2.1 à 4.4 et Tables 2.1 à 4.3). Les résultats avec les tendances des indices bioclimatiques de 1970 à 2020 indiquent que le climat viticole s'est passablement réchauffé depuis le début du siècle passé (Figures 2.2 à 2.6, Figure 3.2 et Table 2.2). Si le climat était en moyenne trop frais pour produire du Pinot noir avant les années 1980, progressivement les conditions sont devenues adaptées à la culture de ce cépage (Figures 2.2 et 3.2). Actuellement, on se retrouve plutôt à la limite maximale de l'adaptabilité climatique de ce cépage du point de vue de l'indice de Huglin comme de la GST (Figures 2.2 à 2.5 et 3.2, et Table 2.2). Néanmoins, pour ces deux cépages, dans une région caractérisée par une forte variabilité interannuelle, il est probablement préférable de se situer plutôt à proximité des maxima chauds des optimums de ces deux indices bioclimatiques. En effet, la profession viticole doit pouvoir amener les raisins à bonne maturation chaque année, et la variabilité interannuelle du climat est élevée à Neuchâtel. Il est également plus aisé dans la pratique pour la profession viticole de maintenir une production qualitative des vins quand on se situe au-dessus des marges optimales théoriques de ces indices bioclimatiques qu'en-dessous. Le Pinot noir est d'ailleurs encore proche de l'optimum au niveau de l'indicateur de Huglin, ce qui démontre que le climat n'est pas encore trop chaud pour ce cépage (Figures 2.3, 2.4, 3.2 et 3.5). La situation climatique actuelle du vignoble neuchâtelois exprimée au travers de ces deux indices bioclimatiques, n'est donc pas encore critique pour le Pinot noir. Ceci d'autant plus car l'échelle d'optimum climatique de ces indices demeure discutable. La Bourgogne, bien qu'au-dessus de l'optimum climatique pour le GST de Jones (2006) continue de produire d'excellents vins issus de Pinot noir (van Leeuwen et al., 2013). Aussi, les températures de l'air ne constituent pas le seul critère à considérer pour la production de vins de qualité.

Nos résultats relatifs à la fraîcheur des nuits qui précèdent les vendanges indiquent que la tendance à la hausse de la température est trois fois supérieure à celle de l'indice de fraîcheur des nuits de Tonietto and Carbonneau (2004) (Figure 2.6). On perçoit en effet sur la Figure 2.6

qu'on est passé depuis 1970 d'une situation de nuits très fraîches, qui ne sont pas théoriquement idéales pour le Pinot noir, à fraîche et donc théoriquement idéales dans les années 2000 à 2020, et que de plus en plus souvent elles tendent à être tempérées, ce qui n'est théoriquement pas optimal du point de vue de cet indice bioclimatique. Les nuits fraîches qui précèdent les vendanges devraient donc de plus en plus souvent être tempérées dans les décennies à venir si la tendance d'un gain de presque 1 degré chaque 10 ans se confirme. Ces résultats sont à relativiser néanmoins, des nuits avec des températures entre 16°C et 22°C, soit tempérées à chaudes, sont corrélées avec un haut niveau d'anthocyanes pour le Pinot noir (Nicholas et al., 2011).

Les tendances futures des indices bioclimatiques, que sont le GST et l'indice héliothermique de Huglin, indiquent que le climat sera adapté aux cépages méridionaux dans les années à venir et notamment pour le milieu du siècle (Figures 3.3 à 3.8 et Table 3.2). L'implantation de cépages méridionaux dans le bas du vignoble peut permettre la production de vins de qualités dans les années à venir si on considère ces indicateurs bioclimatiques. À nouveau, le climat n'est pas le seul critère à considérer, des changements drastiques de l'encépagement ne devraient pas se produire dans les vignobles européens avant 2050 (van Leeuwen et al., 2013). Avec RCP4.5, le climat demeurerait adapté aux cépages méridionaux également après 2050 (Figure 3.3 à 3.8 et table 3.2). Avec RCP8.5, pour la fin du siècle, le climat sera trop chaud, probablement même pour la plupart des cépages méridionaux (Figures 3.3 à 3.8 et Table 3.2). Si on se base sur ces indices bioclimatiques et donc sur la saison végétative de la vigne, le climat moyen du vignoble neuchâtelois ressemblerait alors à celui qu'on trouve actuellement en Espagne (Xeres, La Mancha). Les résultats de Fischer et al. (2015) pour la Suisse occidentale indiquent toutefois que le climat demeurerait relativement humide durant la période végétative, plus qu'il ne l'est dans le sud de l'Espagne. Les périodes de sécheresse devraient tout de même augmenter en été (Fischer et al., 2015). De nombreuses questions quant à l'adaptabilité de la viticulture à ce type de climat nouveau, chaud mais également relativement humide persistent donc.

De manière générale, il faudra surveiller l'arrivée d'éventuelles nouvelles espèces invasives dans les prochaines décennies. Celles-ci affectent aujourd'hui tous les milieux : forêt, agriculture et viticulture. Si ces ravageurs proviennent de climats plus chauds, ils sont susceptibles d'être favorisés par l'augmentation des minimas hivernaux, car cela permet d'augmenter le taux de survie hivernal. Ces minimas ont déjà augmenté en Suisse, et la

tendance devrait se poursuivre (Schneider et al., 2021). Par ailleurs, l'augmentation des degrés-jours augmente le potentiel de développement pour des espèces méridionales, et peut augmenter le nombre de générations annuelles pour les espèces plurivoltines, comme le démontrent nos résultats (Figures 4.2 et 4.3).

Nos résultats indiquent que le climat deviendra plus doux lors de la saison végétative de la vigne, et donc favorable à la venue de nouvelles espèces ravageuses. Les résultats relatifs à l'eudémis de la vigne indiquent que les conditions climatiques deviendront de plus en plus favorables, sans toutefois généraliser la rencontre d'une troisième génération dans le futur (Tables 4.1 et 4.2). Il existe plusieurs méthodes pour lutter contre cet insecte et donc limiter les pertes occasionnées. La lutte par le biais de capsules à confusion sexuelle est particulièrement efficace sur ce lépidoptère (Kehrli & Linder, 2019), de même que l'application de kaolin et de la bactérie *Bacillus thuringiensis* sur les fruits, accompagnée d'un effeuillage autour des grappes (Tacoli et al., 2019). D'ailleurs, les moyens de lutte utilisés par la profession semblent porter leurs fruits dans le vignoble neuchâtelois puisqu'on ne rencontre plus d'eudémis dans le vignoble depuis 2019.

Nos résultats relatifs à la cicadelle de la vigne indiquent qu'on passe de conditions dites adaptées à très adaptées à la survie de cet insecte dans le vignoble neuchâtelois (Figure 4.4 et Table 4.3), quel que soit le scénario climatique utilisé (RCP4.5 et RCP8.5). Alors que les conditions pour *Scaphoideus titanus* pourraient se dégrader en raison d'un excès de chaleur au Tessin (Station de Contone) à la fin du siècle avec RCP8.5 (Sneiders et al., 2019), ça ne devrait pas être le cas à Neuchâtel. Il est possible en revanche que ça puisse le devenir au-delà de 2100, si les émissions de gaz à effet de serre suivent un scénario proche de RCP8.5 jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle et également au 22^{ème} siècle. Pour les décennies à venir, l'idéal serait d'éviter que l'insecte puisse s'introduire dans le vignoble, car les conditions climatiques lui permettront de se développer. Le canton de Vaud s'est retrouvé dans la même situation il y a quelques années, et, malgré les efforts mis en place pour lutter contre l'introduction de cet insecte, l'arrivée de ce dernier n'a pu être évitée. La station viticole cantonale, consciente de la situation, a déjà mis en place un plan d'action. Il consiste en une dizaine de pièges installés dans le vignoble. Une série d'actions de lutte sont prévues si l'insecte parvient à tromper la vigilance des acteurs du vignoble, afin de se montrer le plus réactif possible à une potentielle

introduction de cet insecte dans la région.

Des analyses complémentaires ont également été réalisées dans le cadre de cette thèse, la profession viticole cantonale ayant montré de l'intérêt pour de telles analyses. Nous avons ainsi produit des analyses relatives à la tendance annuelle à rencontrer des étés avec des jours où la température dépasse certains seuils, qui occasionnent des dégâts physiologiques sur la vigne. Les seuils retenus sont ceux qui correspondent à la littérature scientifique, soit 30°C et 35°C. Nous avons également produit des analyses sur le risque de gel printanier. Ces analyses n'ont pas fait l'objet de publications scientifiques comme explicité dans les paragraphes suivants.

Pour les résultats relatifs aux seuils de température journaliers de 30°C et 35°C, nous avons utilisé l'ensemble des jeux de données du set CH2018 (2018) qui incluaient des données pour RCP4.5 et RCP8.5. Au total, ce sont donc 17 jeux de données qui ont été utilisés. Sur la plupart de ces jeux de données, on constate un décrochage entre les valeurs mesurées et celles prédites avec RCP4.5 et RCP8.5, pour le seuil de 30°C comme pour celui de 35°C (Annexes 2 à 35). Cela semble donc correspondre aux constats tirés par Boé et al. (2020) et Schwingshackl et al. (2019) qui relèvent que la hausse des températures estivales pour l'Europe est sous-estimée dans la plupart des RCMs.

Avec les RCMs qui ne présentent pas de décrochage, ou seulement un léger décrochage, on constate qu'il devrait être fréquent de rencontrer une vingtaine de jours qui dépassent les 30°C durant l'été, d'ici l'année 2050 avec RCP4.5 comme RCP8.5 (Annexes 2 à 35). Ceci implique qu'avec des conditions météorologiques extrêmes, on aurait alors potentiellement des étés comprenant 40, voir 50 jours où la température diurne dépasserait 30°C. Pour la fin de siècle, les tendances sont différentes entre RCP4.5 et RCP8.5. Avec RCP4.5 la situation ne change pas vraiment par rapport à celle de 2050. Avec RCP8.5 en revanche, le nombre de jours par an qui dépassent 30°C devrait être de l'ordre de 50 à la fin du siècle, en moyenne.

Il est encore relativement rare de rencontrer des journées où la température dépasse 35°C à Neuchâtel. Les scénarios climatiques futurs indiquent qu'ils deviendront plus fréquents d'ici à l'an 2050 (Annexe 19 à 35). Avec RCP4.5, pour la fin du siècle, on n'observe pas de hausse de la fréquence et du nombre moyen de jours qui dépassent ce seuil pour la plupart des jeux de

données. Avec RCP8.5 en revanche, il deviendrait courant de rencontrer chaque été entre 10 et 20 jours où la température atteint ou dépasse ce seuil. Ces résultats indiquent qu'il devrait être plus fréquent à l'avenir à Neuchâtel de rencontrer des phénomènes comme l'assèchement et le flétrissement des baies, un trouble de l'accumulation de sucre, une diminution de l'acidité titrable, une hausse du pH et une moindre teneur en anthocyanes (Deloire et al., 2021; Laget et al., 2008; Venios et al., 2020).

Les jeux de données qui indiquent les tendances les plus élevées quant au nombre de jours à dépasser ce seuil sont probablement les plus réalistes étant donné que la majorité des GCMs et des RCMs sous-estiment la hausse des températures estivales en Europe continentale, notamment au niveau des maxima journaliers (Boé et al., 2020; Schwingshackl et al., 2019; Sørland et al., 2018; Vautard et al., 2021).

Des résultats sur le risque de gel printanier ont été produits à la demande de la profession viticole cantonale dans le cadre du projet dont est issu cette thèse de doctorat. Si ces analyses n'ont pas fait l'objet d'une publication, c'est parce que les années pour lesquelles des données phénologiques sont disponibles sont trop faibles (20 années de mesures) pour pouvoir produire une solide modélisation. Néanmoins, les résultats avec une « standard error » d'environ 5.7 jours n'indiquent aucune tendance pour le risque de gel printanier relatif au Pinot noir dans la région neuchâteloise (Annexes 36 et 37). Avec RCP4.5 comme RCP8.5, aucune tendance, à la hausse ou à la baisse ne semble se dessiner puisque les valeurs sont largement non-significatives. Ces résultats concordent avec ceux d'autres travaux portant sur d'autres plantes que la vigne, notamment ceux de Vitasse et al. (2018) qui ne relèvent pas de hausse du risque en dessous de 800m d'altitude en Suisse pour les cerisiers et pommiers. La floraison du cerisier a d'ailleurs lieu en général quasiment au même moment que le débourrement de la vigne. Meier et al. (2018) relèvent des tendances différentes pour le gel printanier relatif à la vigne en fonction des RCMs utilisés pour deux sites de données météorologiques et phénologiques en Suisse. Il ressort de leurs analyses que globalement le risque pourrait légèrement augmenter pour la vigne à Aigle et légèrement diminuer à Sion. Toutefois, l'incertitude liées à leurs résultats indique qu'il n'est pas possible de réellement se prononcer sur une claire tendance pour l'avenir pour chacun de ces sites. Il est donc probable que le risque de gel printanier reste inchangé à l'avenir à Neuchâtel. Il faut également relever que nos résultats se basent sur un cépage relativement précoce. Les cas de dégâts dus au gel

printanier sont évidemment plus faibles avec des cépages plus tardifs (Merlot, Cabernet Sauvignon, Syrah, Malbec, etc.). De ce fait, si la profession viticole adopte pour solution d'adaptation dans les décennies à venir une modification progressive de l'encépagement au profit de cépages plus thermophiles et à la phénologie plus tardive, les risques et pertes liées au gel printanier devraient également diminuer progressivement à l'avenir. D'après nos observations phénologiques, le Merlot a ainsi débouqué en moyenne 5 jours plus tard que le Pinot noir pour les années 2019 à 2021. Il n'est pas exclu que si d'autres analyses sont réalisées à l'avenir, mais avec plus d'années de données, elles amènent à des résultats différents et identifient une possible tendance à la hausse ou à la baisse de ce risque.

Nos résultats se limitent à certains aspects des conséquences du changement climatique sur la vigne, car il a fallu procéder à des choix quant aux analyses à effectuer, et donc aux types de données à analyser. Nous avons ainsi fait l'impasse sur plusieurs problématiques qui se verront probablement également modifiées par les changements climatiques à l'avenir. Ainsi, les tendances des maladies cryptogamiques principalement rencontrées à Neuchâtel, que sont le mildiou et l'oïdium, n'ont pas fait l'objet d'analyses. Ces maladies cryptogamiques et la dynamique de leur présence dépendent de facteurs multiples (humidité de l'air, des sols, température de l'air, pluviométrie, etc.). Le jeu de données CH2018 n'offre pas l'ensemble des données simulées nécessaires pour pouvoir proposer une modélisation de l'impact future de ces maladies fongiques sur le vignoble neuchâtelois. De plus, on manque encore de données scientifiques sur ces maladies cryptogamiques pour pouvoir proposer une modélisation qui soit suffisamment solide. Néanmoins, un modèle existe déjà en Suisse pour identifier les moments propices pour traiter les vignes contre ces maladies, en se basant sur la météorologie journalière et sur les prévisions à court terme. Agroscope met ainsi à la disposition de la profession viticole un outil adéquat de prévision pour aider à la lutte contre ces maladies. Nous n'avons pas non plus traité du risque de grêle, quand bien même la région est à risque pour cet événement météorologique qui peut provoquer des dégâts considérables sur les vignes et donc impacter fortement la récolte. Les phénomènes de grêle souffrent encore d'un manque d'analyses et donc de connaissances scientifiques pour que l'on puisse proposer une modélisation du risque de rencontrer ces événements. Le NCCS travaille en ce moment à la production d'un rapport scientifique sur la question. Il n'est donc pas exclu qu'à l'avenir on puisse être en mesure de modéliser les risques de rencontrer ces phénomènes

météorologiques en fonctions de différents scénarios.

Nos cartes utilisent le gradient thermique adiabatique pour modéliser les indices bioclimatiques à une échelle quasi parcellaire. L'utilisation d'autres facteurs, tels que le rayonnement ou l'ensoleillement, l'orientation de la pente, la vitesse et direction des vents, pourrait éventuellement permettre d'améliorer la robustesse de la modélisation. De telles données ne sont toutefois pas disponibles dans les jeux de données simulées pour le futur avec différents scénarios climatiques pour la Suisse, on ne pourrait donc actuellement que se limiter à une modélisation du climat passé. Des analyses sur les aspects hydriques de la vigne, avec une modélisation pour le futur, pourraient constituer un complément intéressant aux travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse.

Les données utilisées dans cette thèse pour modéliser les indices bioclimatiques dans des périodes futures sont celles issues de l'EURO-CORDEX pour la Suisse, soit le dataset CH2018 (2018) mis à disposition de la recherche par le NCCS. Les données ont été préalablement traitées avec l'application d'une « Quantile Mapping (QM) method » pour corriger les biais, afin de proposer aux chercheurs des données journalières de température à l'échelle locale relativement fiables (Fischer et al., 2022). Néanmoins, on peut observer des décrochages entre les valeurs mesurées et celles simulées dans nos différents résultats. Les nouveaux modèles climatiques du CMIP6, plus complexes et avec une meilleure résolution, permettront potentiellement de corriger ce décalage.

5.2. Solutions d'adaptation

On se situe actuellement dans un climat relativement adapté aux cépages méridionaux si on se réfère à la température moyenne de la période végétative de la vigne (sections 3 et 4). L'indice héliothermique de Huglin indique quant à lui qu'on se situe entre les optimums du Pinot noir et du Merlot (section 3) mais que progressivement le climat s'éloignera de l'optimum du Pinot noir, puis de celui du Merlot (section 4). Comme pour ces deux indices il n'est pas tenu compte de l'ensemble des moyens d'adaptation via la pratique culturale ou œnologique pour le vignoble neuchâtelois, il existe des solutions d'adaptation à court terme comme à moyen terme qui ne nécessitent pas de mesures drastiques.

Il est possible d'installer l'irrigation afin d'apporter l'eau nécessaire à la vigne et de diminuer les effets occasionnés par des températures journalières élevées, et donc de maintenir un stress hydrique modéré (Choné et al., 2001; Deloire et al., 2005; van Leeuwen & Vivin, 2008; Zufferey et al., 2017). Il est également envisageable d'implanter des arbres et haies dans et autour du vignoble dans la même optique, et donc d'envisager l'utilisation de l'agroforesterie pour diminuer la température de l'air par l'évapotranspiration des arbres et par l'ombrage dans les vignobles (Bourgade et al., 2020; Veste et al., 2020). Des porte-greffes possédant un système racinaire plus volumineux que ceux implantés actuellement dans le vignoble pourraient constituer une autre solution à court ou moyen terme (Choné et al., 2001; van Leeuwen et al., 2003). Le maintien d'un enherbement, notamment pendant la dormance de la vigne, peut permettre une meilleure rétention d'eau dans les sols et donc également réduire la contrainte hydrique estivale durant les vagues de chaleur. Un écimage du feuillage et une réduction du rapport feuilles/fruits après la véraison permet de diminuer les sucres sans affecter la récolte quantitativement comme qualitativement. Cette technique pourrait éventuellement être mise à profit dans le vignoble neuchâtelois pour le Pinot noir les années chaudes et fortement ensoleillées pour réduire le taux de sucre et donc d'alcool potentiel des vins. Les expériences menées jusqu'à présent démontrent toutes une diminution des sucres suite à cette pratique, avec différents cépages, notamment du Sangiovese (Valentini et al., 2019), du Chasselas (Murisier & Zufferey, 1997) ou encore du Pinot noir (Bois et al., 2022). Cette technique est peut-être déjà pratiquée cependant dans la région. Augmenter les distances entre les lignes de ceps permettrait également de diminuer le stress hydrique (Van Leeuwen et al., 2019). Il serait intéressant de discuter de ces stratégies d'adaptation avec la profession, afin d'évaluer la pertinence des différentes options, et voir ce qui est déjà appliqué par certains. Ceci pourrait offrir une idée de la marge de manœuvre que la viticulture possède pour s'adapter aux changements climatiques.

À court et moyen termes, il faudra également envisager l'utilisation de méthodes d'adaptation en cave pour limiter les modifications non-désirées de la typicité des vins produits. L'utilisation de levures qui synthétisent moins de sucre en alcool comme la levure Lalvin EC118® ou des levures appartenant au genre *Saccharomyces* pourrait permettre de diminuer la teneur en alcool des vins (Dequin et al., 2017). L'évaporation thermique, la séparation transmembranaire, la distillation sous vide, les colonnes à cônes rotatifs ou encore l'osmose

inverse pourraient constituer d'autres solutions pour obtenir le même effet (Samson et al., 2016).

À long terme (au-delà de 2050) les solutions actuellement répertoriées pour diminuer les effets néfastes des changements climatiques risquent de ne pas être suffisantes. Des solutions d'adaptations plus drastiques sont alors envisageables. L'introduction de cépages plus thermophiles dans la partie basse du vignoble peut constituer une solution d'adaptation à long terme. En effet, le climat des prochaines décennies va permettre d'amener à bonne maturation des cépages méridionaux, déjà implantés dans le vignoble sur de petites surfaces, comme le Merlot, la Syrah, le Cabernet Sauvignon, etc. Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse démontrent que le climat est déjà favorable à ces cépages et il le sera encore davantage dans les décennies à venir.

L'autre solution concevable à long terme consisterait à déplacer une partie du vignoble, notamment les cépages les plus précoces, plus haut en altitude afin de permettre au vignoble de bénéficier de températures plus douces durant la période végétative et avant les vendanges. Cette solution nécessiterait toutefois des changements l'aire d'implantation de la vigne, ainsi qu'une modification de la loi en vigueur pour permettre la culture commerciale de vigne au-dessus de 600m. La topographie du Canton implique que les terrains envisageables sont relativement réduits pour cette solution-ci, puisqu'au-dessus de 600m on se trouve vite limité par la forêt, la montagne, ainsi que par le fait qu'une partie importante des surfaces agricoles situées au-dessus de 600m sont des surfaces d'assolement (SDA), et donc potentiellement indisponibles pour la culture viticole (Annexes 38 et 39).

Au niveau des insectes ravageurs, la situation climatique future sera optimale quel que soit le scénario utilisé pour *Scaphoideus titanus*. La station viticole cantonale à Auvernier surveille attentivement l'arrivée potentielle de cet insecte dans le vignoble et s'est déjà préparée à réagir en conséquence. Bien que le climat deviendra de plus en plus propice à l'eudémisme de la vigne, il existe suffisamment de méthodes de lutte efficaces pour empêcher cette espèce de causer des dégâts dans les vignes. De manière générale, le climat sera propice à plusieurs espèces invasives dans les prochaines décennies puisque les GDDs (tb=10°C) relatifs à la période végétative de la vigne vont continuer d'augmenter. Il sera important de surveiller les

modifications dans l'aire de répartition des ravageurs viticoles afin d'anticiper les solutions à préconiser.

5.3. Conclusions générales

Avec les changements climatiques, la phénologie et la typicité des vins produits va continuer à évoluer. Ces changements dépendront des efforts internationaux qui seront entrepris ou non pour réduire les émissions de gaz à effets de serre. La phénologie du Pinot noir et l'équilibre sucre-acide des vins rouges produits à partir de ce cépage vont continuer d'évoluer dans le futur. Les tendances pour le GST et l'HI évoluent quasi identiquement avec RCP4.5 et RCP8.5 jusqu'en 2050. Si la tendance du PHCI se poursuit, la composition aromatique et la couleur des vins rouges produits à partir de ce cépage vont également continuer de changer progressivement dans les prochaines décennies.

Les solutions d'adaptation telles que la mise en place de l'irrigation, la taille tardive des vignes, la réduction du ratio feuille-fruit, un changement de matériel génétique et dans une moindre mesure l'agroforesterie peuvent être utilisés comme solution d'adaptation dans les prochaines décennies, afin de limiter les effets susmentionnés occasionnés par les changements climatiques. Les risques de compétition entre l'enherbement et la vigne, quant à la consommation d'eau et de nutriments dans les sols, devraient constituer un enjeu majeur pour la viticulture à Neuchâtel dans les prochaines décennies. Les techniques culturales qui atténuent ces risques, soit le choix des cépages et porte-greffes adaptés aux caractéristiques du terroir, la réduction de la surface foliaire, et la réduction de la surface enherbée entre les rangs de vignes devraient être considérés dans un premier temps. L'irrigation peut également constituer une mesure d'adaptation si nécessaire. Le cas échéant, il faudrait réfléchir à l'utilisation de l'eau du lac pour l'irrigation, et donc envisager le financement d'installations relativement onéreuses.

Si à l'avenir l'humanité ne fournit pas les efforts nécessaires pour diminuer drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, et que le climat suit un scénario proche de RCP8.5, il faudra considérer des solutions d'adaptations bien plus drastiques pour s'adapter aux changements climatiques. Dans ce cas-là il faudra plutôt envisager une modification de l'encépagement et/ou un déplacement plus haut en altitude des cépages traditionnellement cultivés en-dessous de 600m. Le problème avec la deuxième piste, c'est que les sols à des altitudes plus

élevés sont majoritairement recouverts par des forêts, protégées par le droit suisse. On trouve également une certaine quantité de surfaces d'assolement, soit des terres agricoles qu'on imagine difficilement pouvoir être dézonées en zones viticoles (Annexe 38). De plus, il n'est pas certain que les sols se prêtent à la viticulture. Il est également possible que le risque de gel printanier soit également plus élevé pour la vigne en dessus de 800m et éloigné du lac, puisque c'est le cas pour d'autres cultures.

Bibliographie

- AghaKouchak, A., Chiang, F., Huning, L. S., Love, C. A., Mallakpour, I., Mazdiyasi, O., Moftakhari, H., Papalexioiu, S. M., Ragno, E., & Sadegh, M. (2020). Climate extremes and compound hazards in a warming world. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, *48*, 519-548.
- Altermatt, F. (2010). Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *277*(1685), 1281-1287.
- Amerine, M., & Winkler, A. (1944). Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia*, *15*(6), 493-675.
- Baggiolini, M. (1952). Les stades repères dans le développement de la vigne et leur utilisation pratique, Station Féd. *Essais Agric., Lausanne*.
- Baggiolini, M., Canevascini, V., Caccia, R., Tencalla, Y., & Sobrio, G. (1968). Présence dans le vignoble du Tessin d'une cicadelle néarctique nouvelle pour la Suisse, *Scaphoideus littoralis* Ball. (*Hom., Jassi-dae*), vecteur possible de la flavescence dorée. In: *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft*, Vol. LV (3 and 4), 270-275.
- Baillod, M., & Baggiolini, M. (1993). Les stades repères de la vigne. *Revue suisse Vitic., Arboric., Hortic.*, *38*(1), 7-9.
- Bale, J. S., Masters, G. J., Hodkinson, I. D., Awmack, C., Bezemer, T. M., Brown, V. K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J. C., Farrar, J., Good, J. E. G., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T. H., Lindroth, R. L., Press, M. C., Symrnioudis, I., Watt, A. D., & Whittaker, J. B. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, *8*(1), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x>
- Battaglini, A., Barbeau, G., Bindi, M., & Badeck, F.-W. (2009). European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation [journal article]. *Regional Environmental Change*, *9*(2), 61-73. <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0053-9>
- Becker, C., Rummel, A., Gallinger, J., Gross, J., & Reineke, A. (2023). Mating still disrupted: Future elevated CO₂ concentrations are likely to not interfere with *Lobesia botrana* and *Eupoecilia ambiguella* mating disruption in vineyards in the near future. *OENO One*, *57*(1), 245-252. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.7276>
- Bernardo, S., Dinis, L.-T., Machado, N., & Moutinho-Pereira, J. (2018). Grapevine abiotic stress assessment and search for sustainable adaptation strategies in Mediterranean-like climates. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *38*, 1-20.
- Blanco-Ward, D., Queijeiro, J. G., & Jones, G. (2007). Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. *VITIS*, *46*(2), 63-70.
- Bloesch, B., & De Siebenthal, J. (1988). La température en tant que moyen de prévision et d'avertissement dans la lutte contre les insectes. *Revue suisse de viticulture, arboriculture, horticulture*, *20*(2), 121-126.
- Bloesch, B., & Viret, O. (2008). Stades phénologiques repères de la vigne. *Revue Suisse Vitic Arboric Hortic*, *40*, 1-4.
- Boé, J., Somot, S., Corre, L., & Nabat, P. (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Climate Dynamics*, *54*(5), 2981-3002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>
- Bois, B., Schroeder, L., Orega, M., Gavrilescu, C., Zhang, Y., Santoni, A.-L., Nicolas, S., Delelee, L., Zito, S., & Bossuat, C. (2022). Consequences of late leaf removal on the upper part of the canopy on grapevine water status and grape characteristics of *Vitis vinifera* L. Pinot noir. XXXI International Horticultural Congress (IHC2022): International Symposium on the Vitivinicultural Sector: Which Tools to 1370,
- Bonfante, A., Alfieri, S., Albrizio, R., Basile, A., De Mascellis, R., Gambuti, A., Giorio, P., Langella, G., Manna, P., & Monaco, E. (2017). Evaluation of the effects of future climate change on grape

- quality through a physically based model application: a case study for the Aglianico grapevine in Campania region, Italy. *Agricultural Systems*, 152, 100-109.
- Bonfante, A., & Brillante, L. (2022). Terroir analysis and its complexity : This article is published in cooperation with Terclim 2022 (XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium), 3-8 July 2022, Bordeaux, France. *OENO One*, 56(2), 375-388. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5448>
- Bonfils, J., & Schvester, D. (1960). Les cicadelles (*Homoptera Auchenorrhyncha*) dans leurs rapport avec la vigne dans le Sud-Ouest de la France. *Annales des Epiphyties*, 11(3), 325-336.
- Boudon-Padiou, E., & Maixner, M. (2007). Potential effects of climate change on distribution and activity of insect vectors of grapevine pathogens. Colloque international et pluridisciplinaire sous l'égide de la chaire UNESCO Vin et Culture, Dijon,
- Bourgade, E., Alonso Ugaglia, A., Bustillo, V., Dufourcq, T., Grimaldi, J., Guenser, J., Montagne, V., Ranjard, L., & Ugaglia, A. (2020). VITIFOREST - Exploratory research to access the effects of trees on agroforestrybased vineyards. VITIFOREST : Evaluation de l'impact de l'arbre agroforestier en contexte viticole. *Innovations Agronomiques*, 79, 471-497. <https://doi.org/10.15454/73ry-yq72>
- Boyer, J. (2016). L'implication des acteurs de la recherche dans les processus d'adaptation au changement climatique: l'exemple des régions viticoles françaises. *Innovations*(3), 147-171.
- Bramley, R., Ouzman, J., & Boss, P. K. (2011). Variation in vine vigour, grape yield and vineyard soils and topography as indicators of variation in the chemical composition of grapes, wine and wine sensory attributes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(2), 217-229.
- Branas, J. (1974). *Viticulture*. Dehan. <https://books.google.ch/books?id=puJAAAAYAAJ>
- Briche, E., Beltrando, G., Somot, S., & Quenol, H. (2014). Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region [journal article]. *Climatic Change*, 123(2), 241-254. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1044-5>
- Briere, J.-F., & Pracros, P. (1998). Comparison of temperature-dependent growth models with the development of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 27(1), 94-101.
- Brillante, L., Mathieu, O., Lévêque, J., van Leeuwen, C., & Bois, B. (2018). Water status and must composition in grapevine cv. Chardonnay with different soils and topography and a mini meta-analysis of the $\delta^{13}\text{C}$ /water potentials correlation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(2), 691-697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.8516>
- Butler, J. H., & Montzka, S. A. (2016). The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). *NOAA Earth System Research Laboratory*, 58.
- Camps, J. O., & Ramos, M. C. (2012). Grape harvest and yield responses to inter-annual changes in temperature and precipitation in an area of north-east Spain with a Mediterranean climate. *Int J Biometeorol*, 56(5), 853-864. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0489-3>
- Cartillier, S. (2018). *Année viticole 2017*.
- Castex, V., Cortazar-Atauri, D., Beniston, M., Moreau, J., Semenov, M., Stoffel, M., & Calanca, P. (2023). Exploring future changes in synchrony between grapevine (*Vitis vinifera*) and its major insect pest, *Lobesia botrana*. *OENO One*, 57(1), 161-174.
- Castex, V., de Cortázar-Atauri, I. G., Calanca, P., Beniston, M., & Moreau, J. (2020). Assembling and testing a generic phenological model to predict *Lobesia botrana* voltinism for impact studies. *Ecological Modelling*, 420, 108946.
- Celette, F., Gaudin, R., & Gary, C. (2008). Spatial and temporal changes to the water regime of a Mediterranean vineyard due to the adoption of cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 29(4), 153-162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.04.007>
- CH2018. (2018). *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland - Technical Report*.
- Choi, K. S., Ahn, S.-J., Kim, S. B., Ahn, J. J., Jung, B. N., Go, S. W., & Kim, D.-S. (2018). Elevated CO₂ may alter pheromonal communication in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae).

- Physiological Entomology*, 43(3), 169-179.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/phen.12239>
- Choné, X., Tregoat, O., & van Leeuwen, C. (2001). Fonctionnement hydrique des terroirs, base de l'irrigation raisonnée de la vigne. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 35(N° hors série : « Un raisin de qualité : de la vigne à la cuve »), 47-51.
- Chuche, J. (2010). *Comportement de Scaphoideus titanus, conséquences spatiales et démographiques* Bordeaux 2].
- Chuche, J., & Thiéry, D. (2014). Biology and ecology of the Flavescence dorée vector *Scaphoideus titanus*: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 381-403.
- Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., & Rebetez, M. (2021). Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*.
<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>
- Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., & Rebetez, M. (2022). Effects of climate change on bioclimatic indices in vineyards along Lake Neuchatel, Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(1), 423-436. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03836-1>
- Comte, V., Schneider, L., Calanca, P., Zufferey, V., & Rebetez, M. (2023). Future climatic conditions may threaten adaptation capacities for vineyards along Lake Neuchâtel, Switzerland. *OENO One*, 57(2), 85-100. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7194>
- Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172.
- Cook, B. I., & Wolkovich, E. M. (2016). Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *Nature Climate Change*, 6(7), 715-721.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nclimate2960>
- Croci-Maspoli, M., Schär, C., Fischer, A., Strassmann, K., Scherrer, S., Schwierz, C., Knutti, R., Kotlarski, S., Rajczak, J., Fischer, E., & Bresch, D. (2018). *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland - Technical Report*. National Centre for Climate Services.
- Cuccia, C., Richard, Y., Bois, B., Castel, T., & Thevenin, D. (2010, 2010-09-01). Changement climatique : impacts sur la phénologie du Pinot Noir en Bourgogne. In V. Dubreuil, O. Planchon, H. Quenol, & V. Bonnardot, [Risques et changement climatique]. 23ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, France.
- Daane, K. M., Vincent, C., Isaacs, R., & Ioriatti, C. (2018). Entomological opportunities and challenges for sustainable viticulture in a global market. *Annual review of entomology*, 63, 193-214.
- de Cortazar Atauri, I. G., Duchêne, E., Destrac, A., Barbeau, G., De Resseguier, L., Lacombe, T., Parker, A. K., Saurin, N., & Van Leeuwen, C. (2016). Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One*, 51(2), 115-126.
- De Orduna, R. M. (2010). Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43(7), 1844-1855.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>
- Deloire, A., Ojeda, H., Zebic, O., Bernard, N., Hunter, J., & Carbonneau, A. (2005). Influence de l'état hydrique de la vigne sur le style de vin. *Progrès agricole et viticole*, 122(21), 455-462.
- Deloire, A., Rogiers, S., Šuklje, K., Antalick, G., Zeyu, X., & Pellegrino, A. (2021). Grapevine berry shrivelling, water loss and cell death: an increasing challenge for growers in the context of climate change: Original language of the article: English. *IVES Technical Reviews, vine and wine*.
- Dequin, S., Escudier, J.-L., Bely, M., Noble, J., Albertin, W., Masneuf-Pomarède, I., Marullo, P., Salmon, J.-M., & Sablayrolles, J. M. (2017). How to adapt winemaking practices to modified grape composition under climate change conditions. *OENO One*, 51(2), 205-214.
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1584>
- Doutreloup, S., Bois, B., Pohl, B., Zito, S., & Richard, Y. (2022). Climatic comparison between Belgium, Champagne, Alsace, Jura and Bourgogne for wine production using the regional model MAR. *OENO One*, 56(3), 1-17. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.3.5356>

- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., & Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate research*, 41(3), 193-204.
- Duchêne, E., & Schneider, C. (2005). Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25(1), 93-99. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00886271>
- Eichhorn, K., & Lorenz, H. (1977). Phänologische Entwicklungsstadien der Rebe. Der Deutsche Weinbau.
- Favor, K., & Udawatta, R. P. (2021). Belowground Services in Vineyard Agroforestry Systems. In R. P. Udawatta & S. Jose (Eds.), *Agroforestry and Ecosystem Services* (pp. 65-94). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80060-4_4
- Ferrandino, A., & Lovisolo, C. (2014). Abiotic stress effects on grapevine (*Vitis vinifera* L.): Focus on abscisic acid-mediated consequences on secondary metabolism and berry quality. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 138-147.
- Fischer, A. M., Keller, D. E., Liniger, M. A., Rajczak, J., Schär, C., & Appenzeller, C. (2015). Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective. *International Journal of Climatology*, 35(11), 3204-3219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.4162>
- Fischer, A. M., Strassmann, K. M., Croci-Maspoli, M., Hama, A. M., Knutti, R., Kotlarski, S., Schär, C., Schnadt Poberaj, C., Ban, N., Bavay, M., Beyerle, U., Bresch, D. N., Brönnimann, S., Burlando, P., Casanueva, A., Fatichi, S., Feigenwinter, I., Fischer, E. M., Hirschi, M., Liniger, M. A., Marty, C., Medhaug, I., Peleg, N., Pickl, M., Raible, C. C., Rajczak, J., Rössler, O., Scherrer, S. C., Schwierz, C., Seneviratne, S. I., Skelton, M., Sørland, S. L., Spirig, C., Tschurr, F., Zeder, J., & Zubler, E. M. (2022). Climate Scenarios for Switzerland CH2018 – Approach and Implications. *Climate Services*, 26, 100288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100288>
- FOAG. (2016). *Rapport sur le système de contrôle des vins : Contrôles de la vendange et du commerce des vins* (333.22-00001 \ COO.2101.101.7.296254). <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/services/publikationen/berichte.html>
- Forrest, J. R. (2016). Complex responses of insect phenology to climate change. *Current opinion in insect science*, 17, 49-54.
- Fraga, H., de Cortázar Azares, I. G., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., & Santos, J. A. (2017). Viticulture in Portugal: A review of recent trends and climate change projections. *OENO One*, 51(2), 61-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.2.1621>
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho - Pereira, J., & Santos, J. A. (2012). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2), 94-110. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fes3.14>
- Fraga, H., Santos, J. A., Moutinho-Pereira, J., Carlos, C., Silvestre, J., Eiras-Dias, J., Mota, T., & Malheiro, A. C. (2016). Statistical modelling of grapevine phenology in Portuguese wine regions: observed trends and climate change projections. *The Journal of Agricultural Science*, 154(5), 795-811. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000933>
- Fregoni, C., & Pezzutto, S. (2000). Principes et premières approches de l'indice bioclimatique de qualité de Fregoni. *Progr. Agric. Vitic*, 18, 390-396.
- Fregoni, M. (2003). L'indice bioclimatico di qualità Fregoni. In M. Fregoni, D. Schuster, & A. Paoletti (Eds.), *Terroir, Zonazione, Viticoltura : Tratto internazionale* (pp. 115-127). Phytoline.
- Friend, A. P., & Trought, M. C. J. A. J. o. G. (2007). Delayed winter spur - pruning in New Zealand can alter yield components of Merlot grapevines. *Wine Research*, 13(3), 157-164.
- Fuentes Espinoza, A., Giraud-Héraud, E., Péres, S., Pons, A., & Tempere, S. D. (2016). Réchauffement climatique et acceptabilité des vins par les consommateurs. *Revue des Oenologues*, 158, 1-3.
- Gago Da Silva, A., Gunderson, I., Goyette, S., & Lehmann, A. (2012). Delta-method applied to the temperature and precipitation time series-An example.

- Gaitán, E., & Pino-Otín, M. R. (2023). Using bioclimatic indicators to assess climate change impacts on the Spanish wine sector. *Atmospheric Research*, 286, 106660. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106660>
- Gladstones, J. (1992). *Viticulture and environment*. Winetitles.
- Gutierrez, A. P., Ponti, L., Gilioli, G., & Baumgärtner, J. (2018). Climate warming effects on grape and grapevine moth (*Lobesia botrana*) in the Palearctic region. *Agricultural and Forest Entomology*, 20(2), 255-271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/afe.12256>
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2012). Time of emergence of climate signals [<https://doi.org/10.1029/2011GL050087>]. *Geophysical Research Letters*, 39(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011GL050087>
- Heim, M. (1996). Le climat et la vigne dans le bassin lémanique vaudois. In (pp. 109). Lausanne: Institut de géographie.
- Hsiao, T. C. (1973). Plant Responses to Water Stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24(1), 519-570. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.24.060173.002511>
- Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *C. R. Acad. Agric*, 1117-1126.
- Huglin, P., & Schneider, C. (1998). *Biologie et écologie de la vigne* (L. T. E. DOC, Ed. 2nd edition ed.). TecDoc.
- Hulands, S., Greer, D. H., & Harper, J. I. (2014). The interactive effects of temperature and light intensity on *Vitis vinifera* cv. 'Semillon' grapevines. II. Berry ripening and susceptibility to sunburn at harvest. *European Journal of Horticultural Science*, 79(1), 1-7.
- Iltis, C., Martel, G., Thiéry, D., Moreau, J., & Louâpre, P. (2018). When warmer means weaker: high temperatures reduce behavioural and immune defences of the larvae of a major grapevine pest. *Journal of Pest Science*, 91(4), 1315-1326. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0992-y>
- Ioriatti, C., Anfora, G., Tasin, M., De Cristofaro, A., Witzgall, P., & Lucchi, A. (2011). Chemical Ecology and Management of *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 104(4), 1125-1137. <https://doi.org/10.1603/ec10443>
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-2391. doi:10.1017/9781009157896.001.
- Jackson, D. I., & Lombard, P. B. (1993). Environmental and Management Practices Affecting Grape Composition and Wine Quality - A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44(4), 409-430. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/44/4/409.full.pdf>
- Jakoby, O., Stadelmann, G., Lischke, H., & Wermelinger, B. (2022). 3.9 Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. *Wald im Klimawandel: Grundlagen für Adaptationsstrategien*, 247.
- Joly, D., Bois, B., & Zaksek, K. (2012). Rank-ordering of topographic variables correlated with temperature. *Atmospheric and Climate Sciences*, 02(02), 139-147. <https://doi.org/10.4236/acs.2012.22015>
- Jones, G. (2007). Climate change: observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. *Whitman College Economics Department working paper*, 7, 1-14. (Whitman College)
- Jones, G. V. (2006). Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. *Fine Wine and Terroir: The Geoscience Perspective*(9), 1-14.
- Jones, G. V. (2007). *Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production* Climate and Viticulture Congress, Zarazoga, Spain.
- Jones, G. V. (2012). CLIMATE, GRAPES, AND WINE: STRUCTURE AND SUITABILITY IN A CHANGING CLIMATE.

- Jones, G. V., & Alves, F. (2012). Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal. *International Journal of Global Warming*, 4(3-4), 383-406.
- Jones, G. V., & Davis, R. E. (2000). Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51(3), 249-261. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/51/3/249.full.pdf>
- Jones, G. V., Edwards, E. J., Bonada, M., Sadras, V. O., Krstic, M. P., & Herderich, M. J. (2022). 17 - Climate change and its consequences for viticulture. In A. G. Reynolds (Ed.), *Managing Wine Quality (Second Edition)* (pp. 727-778). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102067-8.00015-4>
- Jones, G. V., & Webb, L. B. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research*, 21(2-3), 103-106. <https://doi.org/10.1080/09571264.2010.530091>
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., & Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality [journal article]. *Climatic Change*, 73(3), 319-343. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>
- Kehrli, P., & Linder, C. (2019). Les ravageurs de la vigne, état des lieux et enjeux futurs. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 51(3), 162-163.
- Kliewer, W. (1973a). Berry composition of *Vitis vinifera* cultivars as influenced by photo-and nycto-temperatures during maturation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*.
- Kliewer, W. (1973b). Berry composition of *Vitis vinifera* cultivars as influenced by photo-and nycto-temperatures during maturation. *Amer Soc Hort Sci J*.
- Kliewer, W. M. (1977). Influence of Temperature, Solar Radiation and Nitrogen on Coloration and Composition of Emperor Grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(2), 96-103. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/28/2/96.full.pdf>
- Kliewer, W. M., & Torres, R. E. (1972). Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *American Journal of Enology and Viticulture*, 23(2), 71-77.
- Lacombe, T. (2012). *Contribution à l'étude de l'histoire évolutive de la vigne cultivée (Vitis vinifera L.) par l'analyse de la diversité génétique neutre et de gènes d'intérêt* Institut National d'Etudes Supérieures Agronomiques de Montpellier].
- Laget, F., Tondut, J.-L., Deloire, A., & Kelly, M. T. (2008). Climate trends in a specific Mediterranean viticultural area between 1950 and 2006. *OENO One*, 42(3), 113-123. <https://doi.org/https://doi.org/10.20870/oeno-one.2008.42.3.817>
- Lamichhane, J. R. (2021). Rising risks of late-spring frosts in a changing climate. *Nature Climate Change*, 11(7), 554-555.
- Lang, C. P., Merkt, N., Geilfus, C.-M., Graeff-Hönninger, S., Simon, J., Rennenberg, H., & Zörb, C. (2019). Interaction between grapevines and trees: effects on water relations, nitrogen nutrition, and wine. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(2), 224-239. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1493197>
- Leach, H., Van Timmeren, S., Wetzal, W., & Isaacs, R. (2019). Predicting Within- and Between-Year Variation in Activity of the Invasive Spotted Wing *Drosophila* (Diptera: Drosophilidae) in a Temperate Region. *Environmental Entomology*, 48(5), 1223-1233. <https://doi.org/10.1093/ee/nvz101>
- Lebon, E. (2002). *Changements climatiques : Quelles conséquences pour la viticulture ?* 6emes Recontres Rhodaniennes, Orange, France.
- Lebon, E., Pellegrino, A., Louarn, G., & Lecoeur, J. (2006). Branch Development Controls Leaf Area Dynamics in Grapevine (*Vitis vinifera*) Growing in Drying Soil. *Annals of Botany*, 98(1), 175-185. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl085>
- Letessier, I., & Fermond, C. (2023). Etude des terroirs viticoles vaudois. 2. caractérisation des sols. *Revue suisse de viticulture, arboriculture, horticulture (Switzerland)*, 36(4).
- Linder, C., Kehrli, P., & Viret, O. (2016). *La Vigne. Volume 2, Ravageurs et Auxiliaires* (Éditions Lavoisier ed., Vol. 2). AMTRA.

- Lovisol, C., Perrone, I., Hartung, W., & Schubert, A. (2008). An abscisic acid-related reduced transpiration promotes gradual embolism repair when grapevines are rehydrated after drought. *New Phytologist*, *180*(3), 642-651. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02592.x>
- Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., & Wanner, H. (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, *303*(5663), 1499-1503.
- Madelin, M., Bois, B., & Chabin, J.-P. (2010). Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique: L'exemple des vignobles de la Côte et des Hautes-Côtes de Beaune. *EchoGéo*, *14*(11). <https://doi.org/10.4000/echogeo.12176>
- Martínez de Toda, F., & Balda, P. (2013). Delaying berry ripening through manipulating leaf area to fruit ratio. *Vitis*, *52*(4), 171-176.
- Mazzetto, F., Lessio, F., Giacosa, S., Rolle, L., & Alma, A. (2020). Relationships between *Drosophila suzukii* and grapevine in North-western Italy: Seasonal presence and cultivar susceptibility.
- Meier, M., Fuhrer, J., & Holzkämper, A. (2018). Changing risk of spring frost damage in grapevines due to climate change? A case study in the Swiss Rhone Valley. *International Journal of Biometeorology*, *62*(6), 991-1002. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1501-y>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, *109*(1), 213. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>
- Menzel, A., & Fabian, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, *397*(6721), 659-659. <https://doi.org/10.1038/17709>
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm - Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O. g., & Briede, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, *12*(10), 1969-1976.
- MeteoSwiss. (2016). *Rapport climatologique 2015*. Zurich: MeteoSwiss
- Mills-Novoa, M., Pszczółkowski, P., & Meza, F. (2016). The Impact of Climate Change on the Viticultural Suitability of Maipo Valley, Chile. *The Professional Geographer*, *68*(4), 561-573. <https://doi.org/10.1080/00330124.2015.1124788>
- Molitor, D., & Junk, J. (2019). Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region. *OENO One*, *53*(3), 409-422. <https://doi.org/10.20870/oenone.2019.53.3.2329>
- Morales-Castilla, I., García de Cortázar-Atauri, I., Cook, B. I., Lacombe, T., Parker, A., van Leeuwen, C., Nicholas, K. A., & Wolkovich, E. M. (2020). Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(6), 2864-2869. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>
- Moret, D., Arrúe, J., López, M., & Gracia, R. (2006). Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon (NE Spain). *Agricultural Water Management*, *82*(1-2), 161-176.
- Moriondo, M., Jones, G. V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., & Bindi, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change [journal article]. *Climatic Change*, *119*(3-4), 825-839. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0739-y>
- Murisier, F., & Zufferey, V. (1997). Rapport feuille-fruit de la vigne et qualité du raisin. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, *29*(6), 355-362.
- Nacambo, S., Leuthardt, F. L., Wan, H., Li, H., Haye, T., Baur, B., Weiss, R. M., & Kenis, M. (2014). Development characteristics of the box - tree moth *C ydalima perspectalis* and its potential distribution in Europe. *Journal of Applied Entomology*, *138*(1-2), 14-26.
- Neethling, E., Barbeau, G., Bonnefoy, C., & Quénot, H. (2011). Evolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire. *Climatologie*, *8*, 79-93. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00694202>

- Nesbitt, A., Dorling, S., Jones, R., Smith, D. K. E., Krumins, M., Gannon, K. E., Dorling, L., Johnson, Z., & Conway, D. (2022). Climate change projections for UK viticulture to 2040: a focus on improving suitability for Pinot noir. *OENO One*, 56(3), 69-87. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.3.5398>
- Nicholas, K. A., Matthews, M. A., Lobell, D. B., Willits, N. H., & Field, C. B. (2011). Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1556-1567. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.010>
- OIV. (2012). *OIV guidelines for vitiviniculture zoning methodologies on a soil and climate level* (Resolution OIV-VITI 423-2012, Issue).
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014a). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014b). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (9291691437).
- Parker, A. K., Hofmann, R. W., van Leeuwen, C., McLachlan, A. R. G., & Trought, M. C. T. (2015). Manipulating the leaf area to fruit mass ratio alters the synchrony of total soluble solids accumulation and titratable acidity of grape berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(2), 266-276. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12132>
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., & Trisurat, Y. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability* GIEC].
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Poni, S., Sabbatini, P., & Palliotti, A. (2022). Facing Spring Frost Damage in Grapevine: Recent Developments and the Role of Delayed Winter Pruning – A Review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 73(4), 211-226. <https://doi.org/10.5344/ajev.2022.22011>
- Pons, A., Allamy, L., Schüttler, A., Rauhut, D., Thibon, C., & Darriet, P. (2017). What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grape?. *OENO One*, 51(2), 141-146. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1868>
- Quénol, H. (2014). *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier Tec&doc.
- Quénol, H., Le Roux, R., & Tissot, C. (2019). *Adaptation de la viticulture au changement climatique: vers des scénarios à haute résolution* in XXXIle Colloque International de l'AIC, Thessaloniki, Greece.
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing [Computer software manual]. Vienna, Austria. In.
- Ramos Martín, M. C., Jones, G. V., & Yuste, J. (2018). Phenology of Tempranillo and Cabernet-Sauvignon varieties cultivated in the Ribera del Duero DO: observed variability and predictions under climate change scenarios. *OENO One*, 52, 31-44. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.1.2119>
- Raupach, T. H., Martius, O., Allen, J. T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K. L., Trapp, R. J., & Zhang, Q. (2021). The effects of climate change on hailstorms. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(3), 213-226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>
- Rebetez, M. (2001). Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 69(1), 13-21. <https://doi.org/10.1007/s007040170032>

- Rebetez, M., & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91(1-4), 27-34.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00704-007-0296-2>
- Renaud, V., & Rebetez, M. (2009). Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(5), 873-880.
- Rigamonti, I. E., Girgenti, P., & Jermini, M. (2017, 18-20.08.2017). Longevity and reproductive profile of *Scaphoideus titanus* Ball adults reared under controlled conditions. Proceedings of Meeting of the IOBC-WPRS Working Group “Integrated protection in viticulture” Riva del Garda.
- Rigamonti, I. E., Jermini, M., Fuog, D., & Baumgärtner, J. (2011). Towards an improved understanding of the dynamics of vineyard - infesting *Scaphoideus titanus* leafhopper populations for better timing of management activities. *Pest Management Science*, 67(10), 1222-1229.
- Rigamonti, I. E., Mariani, L., Cola, G., Jermini, M., & Baumgärtner, J. (2018). Abrupt and gradual temperature changes influence on the climatic suitability of Northwestern Alpine grapevine-growing regions for the invasive grape leafhopper *Scaphoideus titanus* Ball (Hemiptera, Cicadellidae). *Acta Oecologica*, 91, 22-29.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.05.007>
- Rigamonti, I. E., Trivellone, V., Jermini, M., Fuog, D., & Baumgärtner, J. (2014). Multiannual infestation patterns of grapevine plant inhabiting *Scaphoideus titanus* (Hemiptera: Cicadellidae) leafhoppers. *The Canadian Entomologist*, 146(1), 67-79.
- Riou, C., Becker, N., Sotes-Ruiz, V., Gómes-Miguel, V., Carbonneau, A., Panagiotou, M., Calo, A., Costacurta, A., Castro De, R., Pinto, A., Lopes, C., Carneiro, L., & Climaco, P. (1994). *Le déterminisme climatique de la maturation du raisin application au zonage de la teneur en sucre dans la Communauté européenne*. Ed. Centre de recherche de la commission européenne
- Rochard, J. (2016). The vine; an emblematic plant bio-indicatrice of the climatic variations, presentation of project ADVICLIM / La vigne ; une plante bio-indicatrice emblématique des variations climatiques, présentation du projet ADVICLIM. *BIO Web of Conferences*, 7, 1-6, Article 01010. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20160701010>
- Rossini, L., Contarini, M., Giarruzzo, F., Assennato, M., & Speranza, S. (2020). Modelling *Drosophila suzukii* Adult Male Populations: A Physiologically Based Approach with Validation. *Insects*, 11(11), 751. <https://www.mdpi.com/2075-4450/11/11/751>
- Rummukainen, M. (2012). Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *WIREs Climate Change*, 3(2), 115-129. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wcc.160>
- Samson, A., Dequin, S., Salmon, J.-M., Bes, M., Noble, J., Aguera, E., Liénard, P., & Escudier, J.-L. (2016). *Pratiques œnologiques : les dernières tendances en lien avec l'évolution climatique ?* Les 3èmes Assises des Vins du Sud-Ouest, Toulouse.
- Santillán, D., Garrote, L., Iglesias, A., & Sotes, V. (2020). Climate change risks and adaptation: new indicators for Mediterranean viticulture. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(5), 881-899. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09899-w>
- Santillán, D., Iglesias, A., La Jeunesse, I., Garrote, L., & Sotes, V. (2019). Vineyards in transition: A global assessment of the adaptation needs of grape producing regions under climate change. *Science of The Total Environment*, 657, 839-852.
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., Costafreda-Aumedes, S., Kartschall, T., Menz, C., Molitor, D., Junk, J., Beyer, M., & Schultz, H. R. (2020). A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), 3092.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/9/3092>

- Santos, J. A., Malheiro, A. C., Karremann, M. K., & Pinto, J. G. (2011). Statistical modelling of grapevine yield in the Port Wine region under present and future climate conditions. *International Journal of Biometeorology*, 55(2), 119-131.
- Santos, J. A., Malheiro, A. C., Pinto, J. G., & Jones, G. V. (2012). Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research*, 51(1), 89-103. <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v51/n1/p89-103/>
- Schaerer, S., Johnston, H., Gugerli, P., Linder, C., Shaub, L., & Colombi, L. (2007). "Flavescence doree" in Switzerland: spread of the disease in canton of Ticino and of its insect vector, now also in cantons of Vaud and Geneva. *Bulletin of Insectology*, 60(2), 375-376.
- Schneider, L., Comte, V., & Rebetez, M. (2021). Increasingly favourable winter temperature conditions for major crop and forest insect pest species in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298, 108315.
- Schneider, L., Comte, V., & Rebetez, M. (2023). Temperatures during the development season are increasingly favourable for polyvoltine pest species in Switzerland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 338, 109503.
- Schneider, L., Rebetez, M., & Rasmann, S. (2022). The effect of climate change on invasive crop pests across biomes. *Current Opinion in Insect Science*, 100895.
- Schultz, H. R. (2000). Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV - B effects. *Australian Journal of grape and wine research*, 6(1), 2-12.
- Schultz, H. R., & Jones, G. V. (2010). Climate induced historic and future changes in viticulture. *Journal of Wine Research*, 21(2-3), 137-145.
- Schwingshackl, C., Davin, E. L., Hirschi, M., Sørland, S. L., Wartenburger, R., & Seneviratne, S. I. (2019). Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO2 response. *Environmental Research Letters*, 14(11), 114019.
- Seguin, B. (2007). Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture. Communication au colloque Réchauffement climatique: quels impacts probables sur les vignobles,
- Seguin, B., & Garcia de Cortazar, I. (2005). Climate warming: consequences for viticulture and the notion of 'terroirs' in Europe.
- Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N., Pagé, C., & van Leeuwen, C. (2018). The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>
- Shaw, T. B. (2012). A climatic analysis of wine regions growing pinot noir. *Journal of Wine Research*, 23(3), 203-228. <https://doi.org/10.1080/09571264.2012.697356>
- Sneiders, B., Fleury, D., Goyette, S., & Jermini, M. (2019). Influence du réchauffement climatique sur la dynamique des populations de *Scaphoideus titanus* en Romandie. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 51(5), 276-286.
- Sørland, S. L., Schär, C., Lüthi, D., & Kjellström, E. (2018). Bias patterns and climate change signals in GCM-RCM model chains. *Environmental Research Letters*, 13(7), 074017.
- Spangenberg, J. E., & Zufferey, V. (2018). Changes in soil water availability in vineyards can be traced by the carbon and nitrogen isotope composition of dried wines. *Science of The Total Environment*, 635, 178-187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.078>
- Spayd, S. E., Tarara, J. M., Mee, D. L., & Ferguson, J. C. (2002). Separation of Sunlight and Temperature Effects on the Composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot Berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53(3), 171-182. <https://www.ajevonline.org/content/ajev/53/3/171.full.pdf>
- Spellman, G. (1999). Wine, weather and climate. *Weather*, 54(8), 230-239.
- Spring, J.-L., & Zufferey, V. (2009). Influence de l'irrigation sur le comportement de la vigne et sur la qualité de vins rouges dans les conditions du Valais central. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*, 41(2), 103-112.

- Stock, M., Gerstengarbe, F. W., Kartschall, T., & Werner, P. C. (2005). Reliability of climate change impact assessments for viticulture.
- Stoeckli, S., Felber, R., & Haye, T. (2020). Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International journal of biometeorology*, *64*, 2019-2032.
- Stott, P. A., Christidis, N., Otto, F. E., Sun, Y., Vanderlinden, J. P., van Oldenborgh, G. J., Vautard, R., von Storch, H., Walton, P., & Yiou, P. (2016). Attribution of extreme weather and climate - related events. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *7*(1), 23-41.
- Tacoli, F., Cargnus, E., Kiaeian Moosavi, F., Zandigiaco, P., & Pavan, F. (2019). Efficacy and mode of action of kaolin and its interaction with bunch-zone leaf removal against *Lobesia botrana* on grapevines. *Journal of Pest Science*, *92*(2), 465-475. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-1029-2>
- Tate, A. B. (2001). Global Warming's Impact on Wine. *Journal of Wine Research*, *12*(2), 95-109. <https://doi.org/10.1080/09571260120095012>
- Team, R. C. (2013). R: A language and environment for statistical computing.
- Thiéry, D. (2008). Les tordeuses nuisibles à la vigne. In *Les ravageurs de la vigne* (2nd ed., pp. 214-246). Féret Publication. <https://prodira.inra.fr/record/27513>
- Thistlewood, H. M. A., Gill, P., Beers, E. H., Shearer, P. W., Walsh, D. B., Rozema, B. M., Acheampong, S., Castagnoli, S., Yee, W. L., Smytheman, P., & Whitener, A. B. (2018). Spatial Analysis of Seasonal Dynamics and Overwintering of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in the Okanagan-Columbia Basin, 2010–2014. *Environmental Entomology*, *47*(2), 221-232. <https://doi.org/10.1093/ee/nvx178>
- Tilloy, V., Cadiere, A., Ehsani, M., & Dequin, S. (2015). Reducing alcohol levels in wines through rational and evolutionary engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. *Journal of Food Microbiology*, *213*(20), 49-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.06.027>
- Tomasi, D., Jones, G. V., Giust, M., Lovat, L., & Gaiotti, F. (2011). Grapevine Phenology and Climate Change: Relationships and Trends in the Veneto Region of Italy for 1964–2009. *American Journal of Enology and Viticulture*, *62*(3), 329-339. <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108>
- Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, *124*(1), 81-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>
- Tonina, L., Giomi, F., Sancassani, M., Ajelli, M., Mori, N., & Giongo, L. (2020). Texture features explain the susceptibility of grapevine cultivars to *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) infestation in ripening and drying grapes. *Scientific reports*, *10*(1), 1-13.
- Tóth, J., & Végvári, Z. (2016). Future of winegrape growing regions in E urope. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, *22*(1), 64-72.
- Touzeau, J. (1981). Modélisation de l'évolution de l'Eudémis de la Vigne pour la région Midi Pyrénées. *Bollettino di zoologia agraria e di bachicoltura*, *Ser. II*(16), 26-28.
- Tschurr, F., Feigenwinter, I., Fischer, A. M., & Kotlarski, S. (2020). Climate scenarios and agricultural indices: a case study for Switzerland. *Atmosphere*, *11*(5), 535.
- Unwin, T. (2005). *Wine and the vine: an historical geography of viticulture and the wine trade*. Routledge.
- Urhausen, S., Brienen, S., Kapala, A., & Simmer, C. (2011). Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Moselle region [journal article]. *Climatic Change*, *109*(3), 349-373. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0059-z>
- Valentini, G., Allegro, G., Pastore, C., Colucci, E., & Filippetti, I. (2019). Post - veraison trimming slow down sugar accumulation without modifying phenolic ripening in Sangiovese vines. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *99*(3), 1358-1365.
- van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics*, *11*(1), 150-167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>

- van Leeuwen, C., & Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51(2), 147-154.
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1647>
- Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., De Resseguier, L., & Ollat, N. (2019). An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. *Agronomy*, 9(9), 514.
- van Leeuwen, C., Friant, P., Choné, X., Tregoat, O., Koundouras, S., & Dubourdieu, D. (2004). Influence of climate, soil, and cultivar on Terroir. *American Journal of Enology and Viticulture*, 55, 207-217.
- van Leeuwen, C., Schultz, H. R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchêne, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.-P., Quénot, H., Touzard, J.-M., Malheiro, A. C., Bavaresco, L., & Delrot, S. (2013). Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(33), E3051-E3052. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307927110>
- van Leeuwen, C., & Seguin, G. (1994). Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion, 1990). *OENO One*, 28(2), 81-110.
- van Leeuwen, C., & Seguin, G. (2006). The concept of terroir in viticulture. *Journal of Wine Research*, 17(1), 1-10. <https://doi.org/10.1080/09571260600633135>
- van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D., & Gaudillère, J.-P. (2009). Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43(3), 121-134.
<https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>
- van Leeuwen, C., Tregoat, O., Choné, X., Jaeck, M., Rabusseau, S., & Gaudillere, J. (2003). Le suivi du régime hydrique de la vigne et son incidence sur la maturation du raisin. *Bulletin de l'OIV*, 76(867-868), 367-378.
- van Leeuwen, C., & Vivin, P. (2008). Alimentation hydrique de la vigne et qualité des raisins. *Innovations Agronomiques*, 2, 159-167.
- Vautard, R., Kadygrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., Coppola, E., Corre, L., van Meijgaard, E., Nogherotto, R., Sandstad, M., Schwingshackl, C., Somot, S., Aalbers, E., Christensen, O. B., Ciarlo, J. M., Demory, M.-E., Giorgi, F., Jacob, D., Jones, R. G., Keuler, K., Kjellström, E., Lenderink, G., Levvasseur, G., Nikulin, G., Sillmann, J., Solidoro, C., Sørland, S. L., Steger, C., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K., & Wulfmeyer, V. (2021). Evaluation of the Large EURO-CORDEX Regional Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(17), e2019JD032344.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019JD032344>
- Venios, X., Korkas, E., Nisiotou, A., & Banilas, G. (2020). Grapevine responses to heat stress and global warming. *Plants*, 9(12), 1754.
- Veste, M., Littmann, T., Kunneke, A., Du Toit, B., & Seifert, T. (2020). Windbreaks as part of climate-smart landscapes reduce evapotranspiration in vineyards, Western Cape Province, South Africa. *Plant, Soil and Environment*, 66(3), 119-127.
- Viret, O., & Gindro, K. (2014). *La Vigne. Volume 1, Maladies fongiques* (Éditions Lavoisier ed., Vol. 1). Amtra.
- Vitasse, Y., & Rebetez, M. (2018). Unprecedented risk of spring frost damage in Switzerland and Germany in 2017. *Climatic Change*, 149(2), 233-246.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10584-018-2234-y>
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 60-69.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>

- Vittoz, P., Cherix, D., Gonseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., & Zumbach, S. (2013). Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. *Journal for Nature Conservation*, 21(3), 154-162.
- Webb, L., Watt, A., Hill, T., Whiting, J., Wigg, F., Dunn, G., Needs, S., & Barlow, E. (2009). Extreme heat: managing grapevine response. *GWRDC and University of Melbourne: Melbourne*.
- Wolkovich, E. M., García de Cortázar-Atauri, I., Morales-Castilla, I., Nicholas, K. A., & Lacombe, T. (2018). From Pinot to Xinomavro in the world's future wine-growing regions. *Nature Climate Change*, 8(1), 29-37. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0016-6>
- Yan, Y., Wang, Y.-C., Feng, C.-C., Wan, P.-H. M., & Chang, K. T.-T. (2017). Potential distributional changes of invasive crop pest species associated with global climate change. *Applied geography*, 82, 83-92.
- Zito, S., Caffarra, A., Richard, Y., Castel, T., & Bois, B. (2018). Climate change and vine protection: The case of mildews management in Burgundy. *E3S Web of Conferences*,
- Zohner, C. M., Mo, L., Renner, S. S., Svenning, J.-C., Vitasse, Y., Benito, B. M., Ordonez, A., Baumgarten, F., Bastin, J.-F., & Sebald, V. (2020). Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(22), 12192-12200.
- Zufferey, V., Cochard, H., Ameglio, T., Spring, J.-L., & Viret, O. (2011). Diurnal cycles of embolism formation and repair in petioles of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Chasselas). *Journal of Experimental Botany*, 62(11), 3885-3894. <https://doi.org/10.1093/jxb/err081>
- Zufferey, V., Gindro, K., Verdenal, T., Murisier, F., & Viret, O. (2022). *La vigne. Anatomie et physiologie. nutrition, carences et accidents physiologiques*.
- Zufferey, V., Pythoud, K., Letessier, I., Reynard, J.-S., Monico, C., & Murisier, F. (2008). Etudes des terroirs viticoles suisses. *Revue suisse de viticulture, arboriculture, horticulture*, 40(6), 367.
- Zufferey, V., Spring, J.-L., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., Koestel, C., Rösti, J., Gindro, K., Spangenberg, J., & Viret, O. (2017). The influence of water stress on plant hydraulics, gas exchange, berry composition and quality of Pinot Noir wines in Switzerland. *OENO One*, 51(1), 17-27. <https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.1.1314>
- Zurbenko, I. G., & Smith, D. (2018). Kolmogorov–Zurbenko filters in spatiotemporal analysis [<https://doi.org/10.1002/wics.1419>]. *WIREs Computational Statistics*, 10(1), e1419. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wics.1419>

Liste des Figures

Figure 1.1. Stades phénologiques principaux de la vigne.....	20
Figure 1.2. Cycle biologique de la vigne.	21
Figure 1.3. Adéquation bioclimatique des cépages en fonction de la température moyenne de la période végétative de la vigne (GST). Les bornes traitillées indiquent une marge d'erreur allant de 0.2 à 0.5 degrés.....	33
Figure 1.4. Principaux scénarios de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et leurs implications temporelles sur le forçage radiatif terrestre.	41
Figure 1.5. Températures de l'air en Suisse mesurées et modélisées pour le futur avec les deux scénarios les plus extrêmes, RCP2.6 et RCP8.5.....	42
Figure 2.1. Location of the study area, vineyards and temperature loggers. AG loggers are temperature loggers from Agrometeo, IGG loggers are loggers from the Geography department of the University of Neuchatel, and MS loggers are loggers from MeteoSwiss.	53

Figure 2.2. Trends in the growing season temperature (GST) averages in Switzerland (a) and at the NEU station (b) from 1900 to 2019. The PN red band and MN blue band in (b) indicate the GST suitability for Pinot Noir and Merlot, respectively, with a ± 0.2 – 0.5°C error margin, based on GST according to Jones (2006). Lm 1974 to 2019 is the linear model, ‘***’ indicates that $p < 0.001$. The two curved blue lines around the linear model indicate the confidence interval. They show the mean standard error of this model, which corresponds to the year-over-year variability of the index in the region. This interannual variability is represented in the graph by two predictive intervals, with 90% of the points inside for the first one (PI.90; dotted dark blue lines) and 95% inside for the second one (PI.95; solid dark blue lines). They indicate that HI was located between these lines 9 years out of 10 for PI.90 and 19 years out of 20 for PI.95. The black dotted lines show the sequential regression. The dark green line shows the 11-year moving average (MovAve). 57

Figure 2.3. Trends in Huglin’s heliothermal index (HI) for the NEU station (485 m a.s.l.) from 1900 to 2019. Lm 1972 to 2019 is the linear model, ‘***’ indicates that $p < 0.001$. The two curved blue lines around the linear model indicate the confidence interval. They show the mean standard error of this model, which corresponds to the year-over-year variability of the index in the region. This interannual variability is represented in the graph by two predictive intervals, with 90% of the points inside for the first one (PI.90; dotted dark blue lines) and 95% inside for the second one (PI.95; solid dark blue lines). They indicate that HI was located between these lines 9 years out of 10 for PI.90 and 19 years out of 20 for PI.95. They differ from the average by approximately ± 200 (PI.90) and ± 250 (PI.95) in extreme years. The PN red band and MN blue band indicate the optimum HI for Pinot Noir and Merlot, respectively. The black dotted lines show the sequential regression. The dark green line shows the 11-year moving average (MovAve)..... 59

Figure 2.4. Mean Huglin’s heliothermal index (HI) in the study region during the periods 1970–1979 (a) and 2010–2019 (b). The four temperature loggers (4b) are represented by circles (only NEU station was available for 4a). The represented values correspond to the mean HI values over each period. The isolines represent 50 m elevation classes, ranging from 430 m to more than 1000 m a.s.l. The color gradients indicate changes in HI in increments of 100. Points show values measured by temperature loggers. PN (red) and MN (blue) bands indicate the optimum HI for Pinot Noir and Merlot, respectively. 61

Figure 2.5. Huglin’s heliothermal index (HI) in the region of Neuchatel during a cold year (2014, a) and a warm year (2018, b). The 6 and the 25 temperature loggers with data available in 2014 and 2018, respectively, are represented by circles. 65

Figure 2.6. Average first day of harvest (a) and trends in cool night index (CI) and prior to harvest cool night index (PHCI; b) since 1970 at the NEU station. 66

Figure 2.7. Cross-section between daily maximum (a) and mean (b) temperature data and values predicted by the adiabatic lapse rate model for each day and each station except CHM. The scale differs between the panels. 76

Figure 3.1. Locations of Neuchatel vineyards and of the air temperature loggers. IGG loggers are our own, AG loggers are from Agroscope, and MS loggers are from MeteoSwiss. Precise logger coordinates (longitude, latitude and altitude) are detailed in the Supplementary Material. Acronyms: IGG = Institut de Géographie, University of

Neuchatel; AG = Agrometeo; MS = Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology (MeteoSwiss); ST = station.	83
Figure 3.2. Average growing season temperature (GST) and Huglin’s heliothermal index (HI) in Neuchatel vineyards during the period 1991–2020. The bold black line indicates the altitudinal limit of the vineyards (600 m a.s.l.). Longitude and latitude are given according to the Swiss reference system CH1903 (EPSG:21781).	87
Figure 3.3. Trends in average growing season temperature (GST) and Huglin’s heliothermal index (HI) with all available data of the CH2018 dataset with RCP4.5 and RCP8.5. MV are measured values, KZ is the Kolmogorov–Zurbenko filter, RCMs are the CH2018 regional climate model data, and SRE is the RCM SMHI-RCA4-ECEARTH_EUR11.	88
Figure 3.4. The probability that the growing season temperature (GST) exceeds 17 °C (two first panels on the top left) or 19 °C (two panels on the top right), and Huglin’s heliothermal index (HI) exceeds 1800 (two panels on the bottom left) or 2100 units (two panels on the bottom right). The probability is computed for each year considering the number of model chains indicating an exceedance of the given threshold divided by the total number of chains included in the ensemble. The blue lines are a filtered version of the raw estimates obtained by applying a Kolmogorov–Zurbenko filter (filter length = 11 years, 2 iterations).	89
Figure 3.5. Trends in average growing season temperature (GST) and in Huglin’s heliothermal index (HI) at the Neuchatel weather station from 1970 to 2099. Grey circles indicate measured values from 1970 to 2020. Green circles and red circles indicate simulated values under RCP4.5 and RCP8.5, respectively. Eleven-year moving averages are shown as thick solid lines in the corresponding colours. The coloured bands in the background indicate vineyard climate types according to the classifications by Jones (2006) and Huglin and Schneider (1998).	92
Figure 3.6. Predicted average growing season temperature (GST) for 2035–2064 and 2070–2099 with RCP4.5 and RCP8.5. The bold line indicates the altitudinal limit of the current vineyards (600 m a.s.l.). Longitude and latitude are given according to the Swiss reference system CH1903 (EPSG:21781).	93
Figure 3.7. Predicted Huglin’s index (HI) values for the 2035–2064 and 2090–2099 periods with RCP4.5 and RCP8.5. The bold line indicates the altitudinal limit of the current vineyards (600 m a.s.l.). Longitude and latitude are given according to the Swiss reference system CH1903 (EPSG:21781).	94
Figure 3.8. Average growing season temperature (GST) and Huglin’s heliothermal index (HI) as a function of altitude for three periods (1991–2020, 2034–2064 and 2070–2099) with RCP4.5 and RCP8.5. The dotted grey line indicates the current altitudinal limit of vineyards (600 m a.s.l.). The coloured bands correspond to the same classifications as shown in Figure 2. MV indicates measured values.	97
Figure 4.1 Locations of the Neuchatel vineyards considered in this study and of the air temperature loggers. IGG loggers are our own, AG are Agroscope loggers, and MS are MeteoSwiss loggers.	113
Figure 4.2 Growing degree days (GDDs; base development temperature threshold [tb] = 10°C) at the MeteoSwiss climate station NEU for the past decades and for projections with Representative Concentration Pathway RCP4.5 and RCP8.5 (a). Annual GDDs measured (1970-2022, thin solid lines) and simulated under RCP4.5 and RCP8.5 (2023-2099, dashed lines). Eleven-year moving averages are shown as	

thick solid lines, and slopes (\pm SE) of the linear regressions are displayed. Average spatial distribution of GDDs ($t_b = 10^\circ\text{C}$) for 1991–2020 (b). The bold black line in (b) indicates the current elevational limit of the vineyards (600 m a.s.l.).	117
Figure 4.3. Trends in growing degree days (GDDs; base development temperature threshold [t_b] = 10°C) for the periods 2035–2064 and 2070–2099 with RCP4.5 and RCP8.5. The bold black line indicates the current elevational limit of the vineyards (600 m a.s.l.).	118
Figure 4.4. Median number of eggs per female and per year for three periods (1991–2020, 2035–2064 and 2070–2099) with RCP4.5 and RCP8.5 for future periods. Boxplot showing the minimum, the maximum, the sample median, and the first and third quartiles.	120

Liste des Tables

Table 1.1. Indices bioclimatiques, équations, période de calcul pour les équations pour l'hémisphère nord et sources littéraires, adapté de Jones et al. (2005), Blanco-Ward et al. (2007), et OIV (2012).	34
Table 2.1. Bioclimatic indices, the corresponding equations for the Northern Hemisphere, and literature sources, adapted from Jones et al. (2005), Blanco-Ward, Queijeiro and Jones (2007), and OIV (2012)	51
Table 2.2. Average value of Huglin's heliothermal index (HI), variance (Var), standard deviation (Sd) and interquartile range (IQR) of each decade since 1970 for the NEU station.	62
Table 2.3. Location, type, source, first complete year of data record, and number of missing values for each station.	75
Table 3.1. Climatic classes for Huglin's heliothermal index and average growing season temperature	82
Table 3.2. Linear trends in GST and HI for the NEU station at mid-century (2035–2064) and at the end of the century (2070–2099) under RCP4.5 and RCP8.5	92
Table 3.3. Temperature loggers information	107
Table 4.1. Frequency of third-generation outbreaks of European grapevine moths in the different periods.	119
Table 4.2. Mean date of generation start for the European grapevine moth in the different periods.	119
Table 4.3. The mean date of the first outbreak by the American grapevine leafhopper. SE = standard error.	120
Table 4.4. Location, type, source, first complete year of data record, and number of missing values for each climate station used in the study.	127

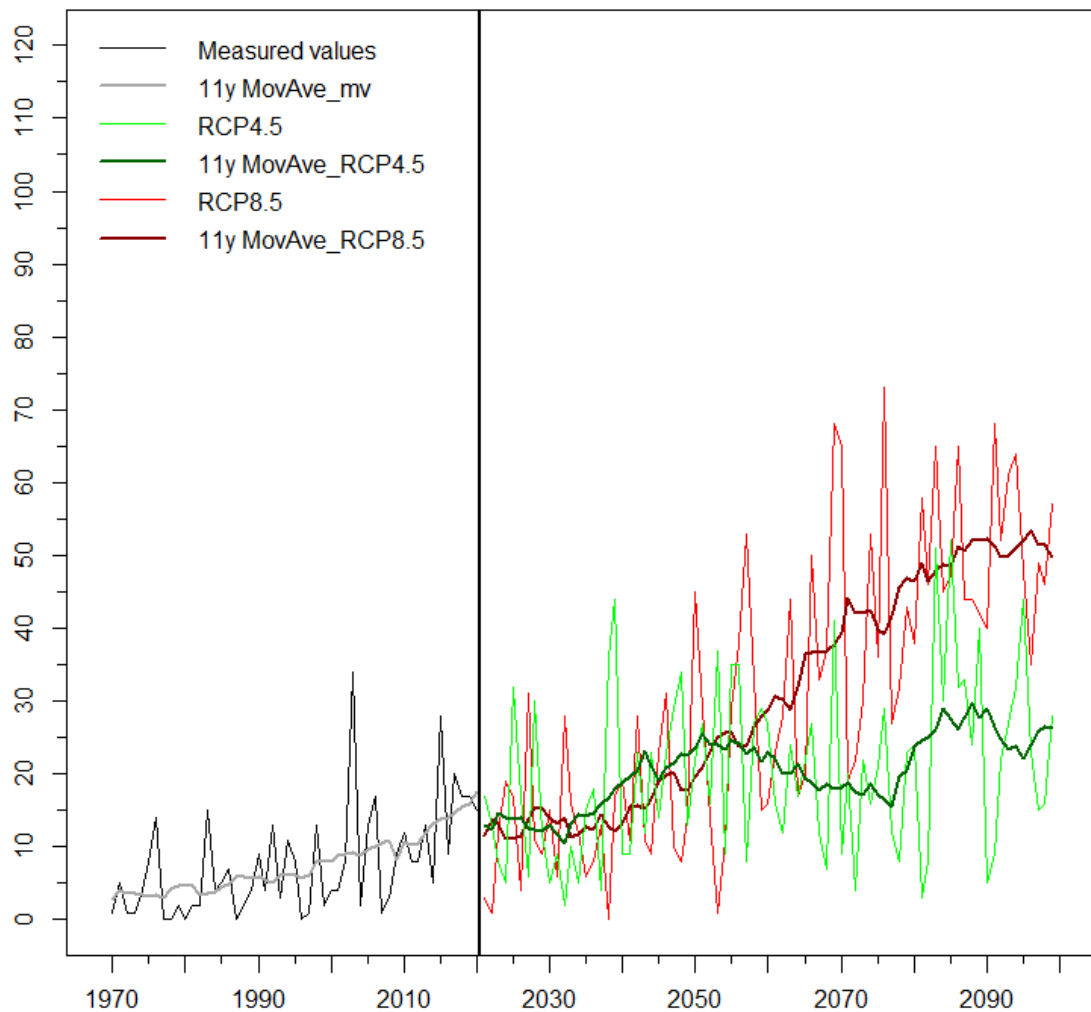
6. Annexes

6.1. Liste des stations météorologiques utilisées

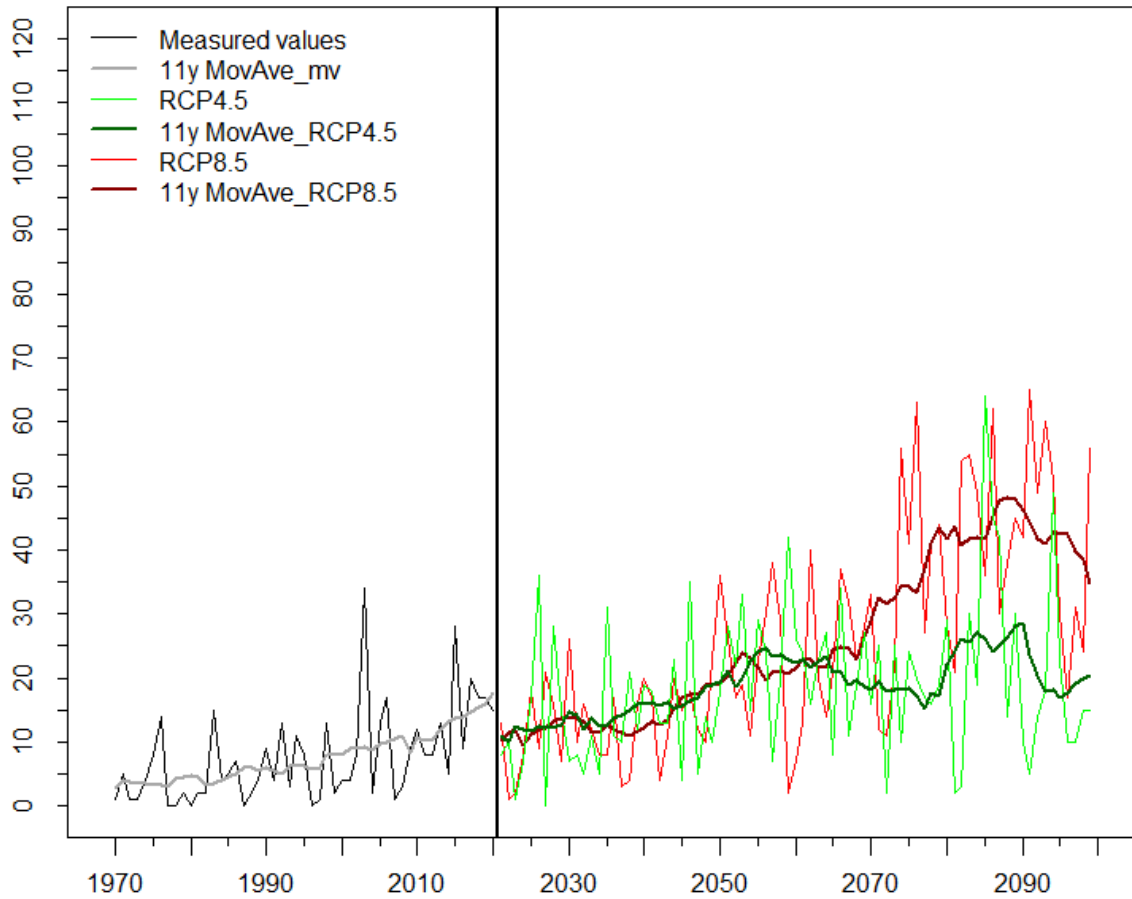
Nom	Alt.	Long. LV03	Lat. LV03	Type de données	Source	Depuis	Tmax NA	Tmin NA
MMBOY	510	553199	200608	Tmin and Tmax (°C)	MS	2013	127 (8.48 %)	127 (8.48 %)
CHM	1136	565060	211006	Tmin and Tmax (°C)	MS	1984	0	0
CRM	431	571160	210800	Tmin and Tmax (°C)	MS	1992	190 (3.17 %)	193 (3.22 %)
NEU	485	563086	205559	Tmin and Tmax (°C)	MS	1874	0	0
CHP	490	540540	187685	Tmin and Tmax (°C)	AG	2006	156 (5.21 %)	257 (8.58 %)
CON	449	545910	189800	Tmin and Tmax (°C)	AG	2017	0	0
CRS	440	569703	211424	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	13 (0.47 %)	112 (4.03 %)
GOR	472	550709	195300	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	3 (0.11 %)	64 (2.30 %)
PRA	445	573722	200314	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	0	0
TWA	460	580110	217085	Tmin and Tmax (°C)	AG	2007	20 (0.72 %)	123 (4.42 %)
ST001	494	556889	203227	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST002	451	556780	202606	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST003	441	555152	200667	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST004	435	557587	203060	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST005	476	554953	199127	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST006	511	553533	201286	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST007	627	552986	202206	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST008	702	552655	202681	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST009	752	552257	203175	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST010	864	552143	203864	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST011	874	554903	206796	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST012	1037	552888	204729	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST013	785	554761	204936	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST014	660	554805	203626	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST015	597	556363	203887	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST016	578	557261	204039	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST017	528	557606	203628	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST018	791	556028	205090	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST019	929	554575	206781	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2018	0	0
ST020	540	561766	205592	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST021	476	567711	209604	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST022	540	565067	207640	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST023	601	570168	212257	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST024	504	569508	211666	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2019	0	0
ST025	457	553768	198004	Tmin and Tmax (°C)	IGG	2020	0	0

Annexe 1. Noms, coordonnées, type de données utilisées, source, première année de données complètes et nombre de valeurs manquantes pour chaque station.

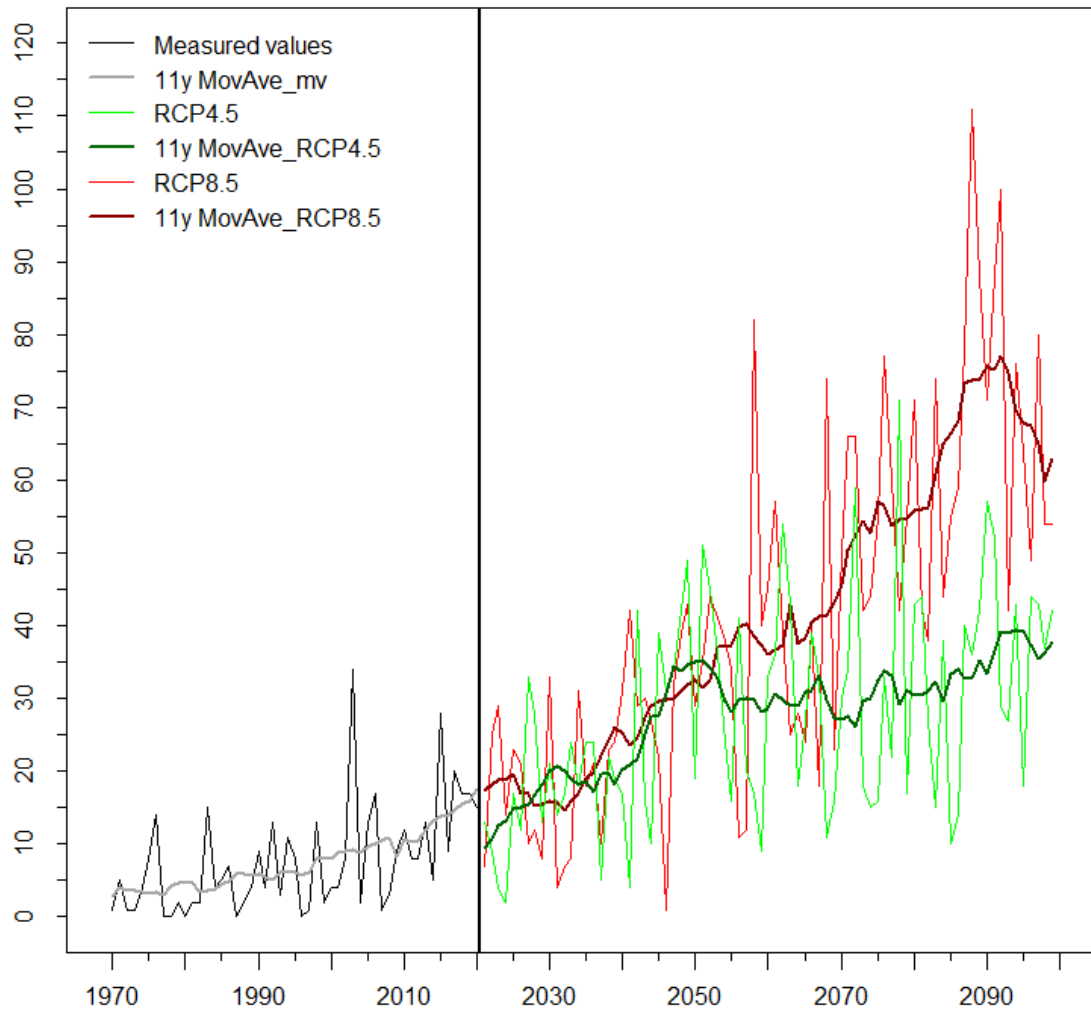
6.2. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C



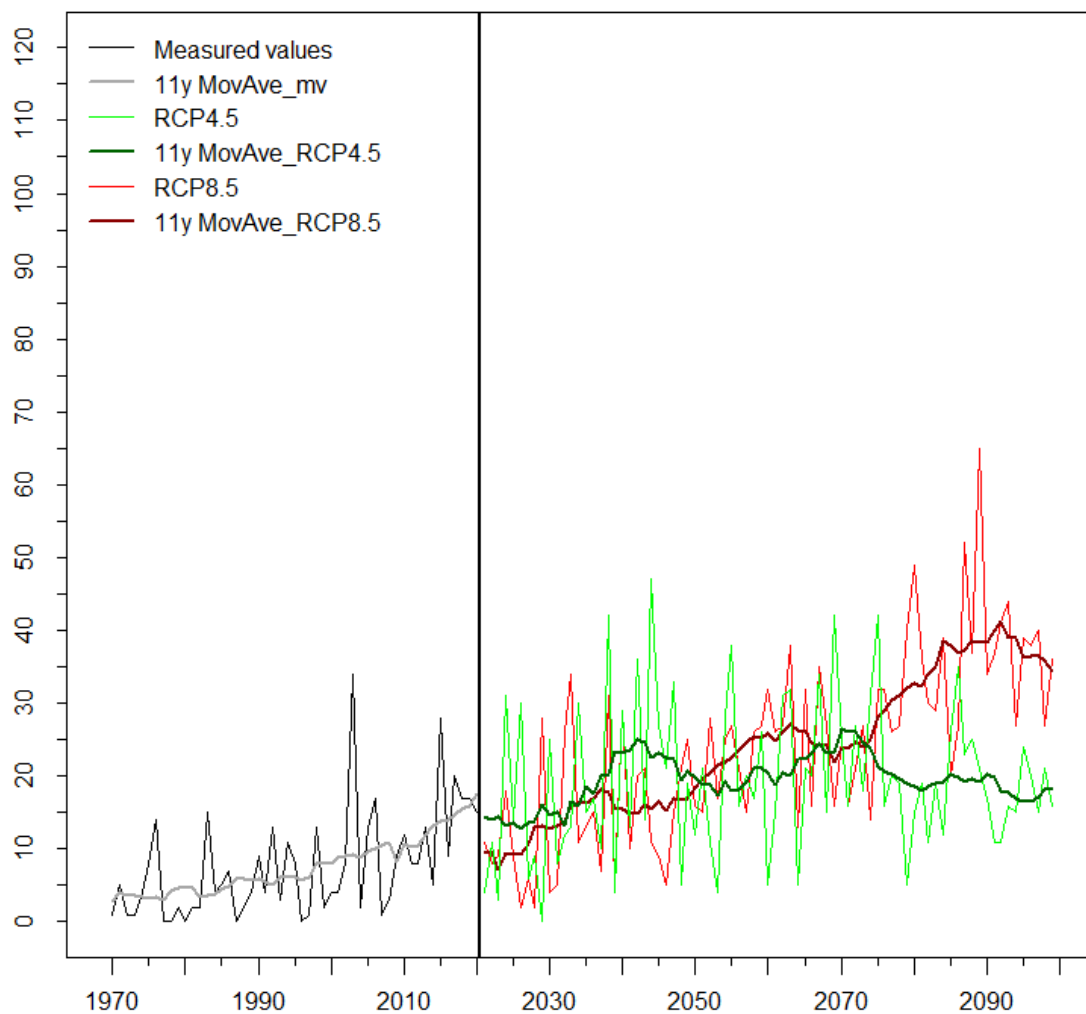
Annexe 2. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_ECEARTH_EUR11.



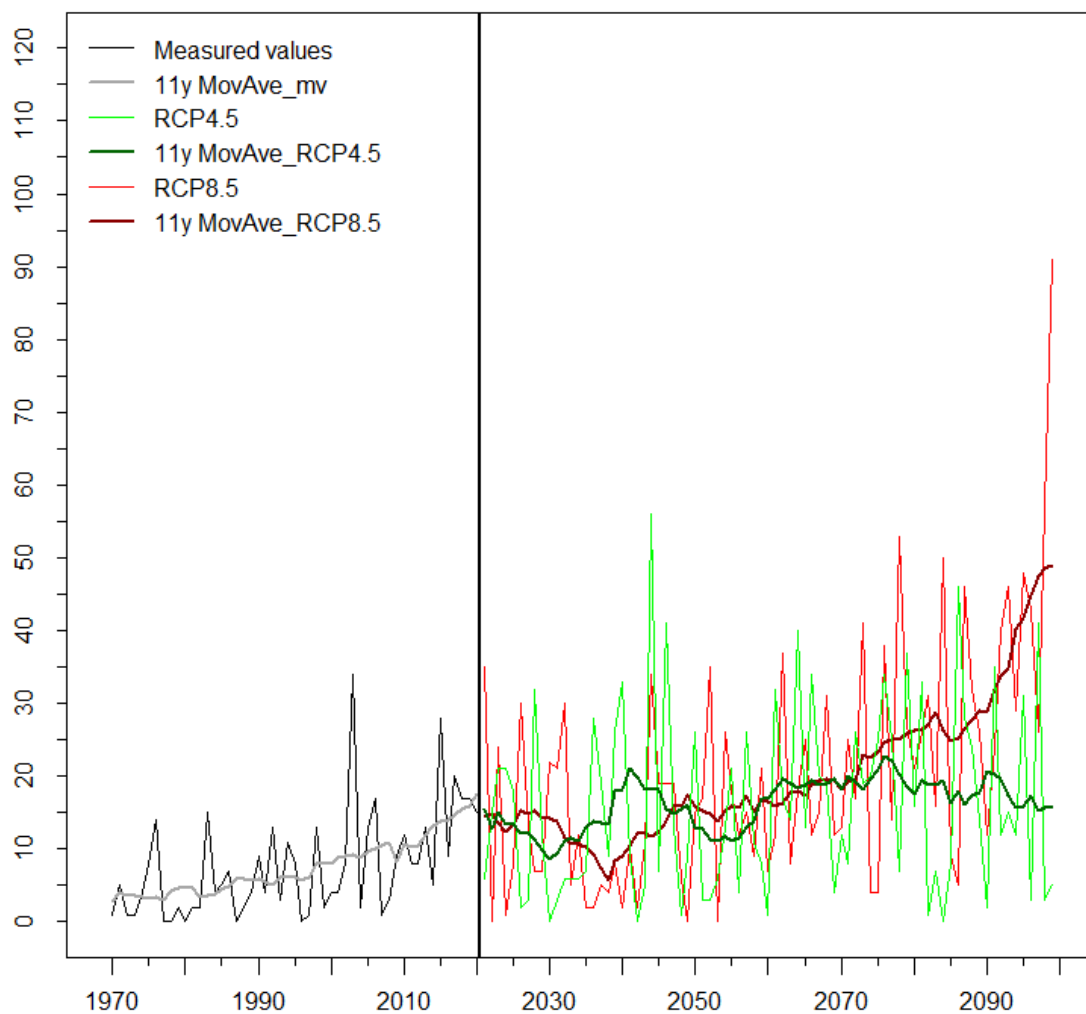
Annexe 3. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données CLMCOM-CCLM4_ECEARTH_EUR11.



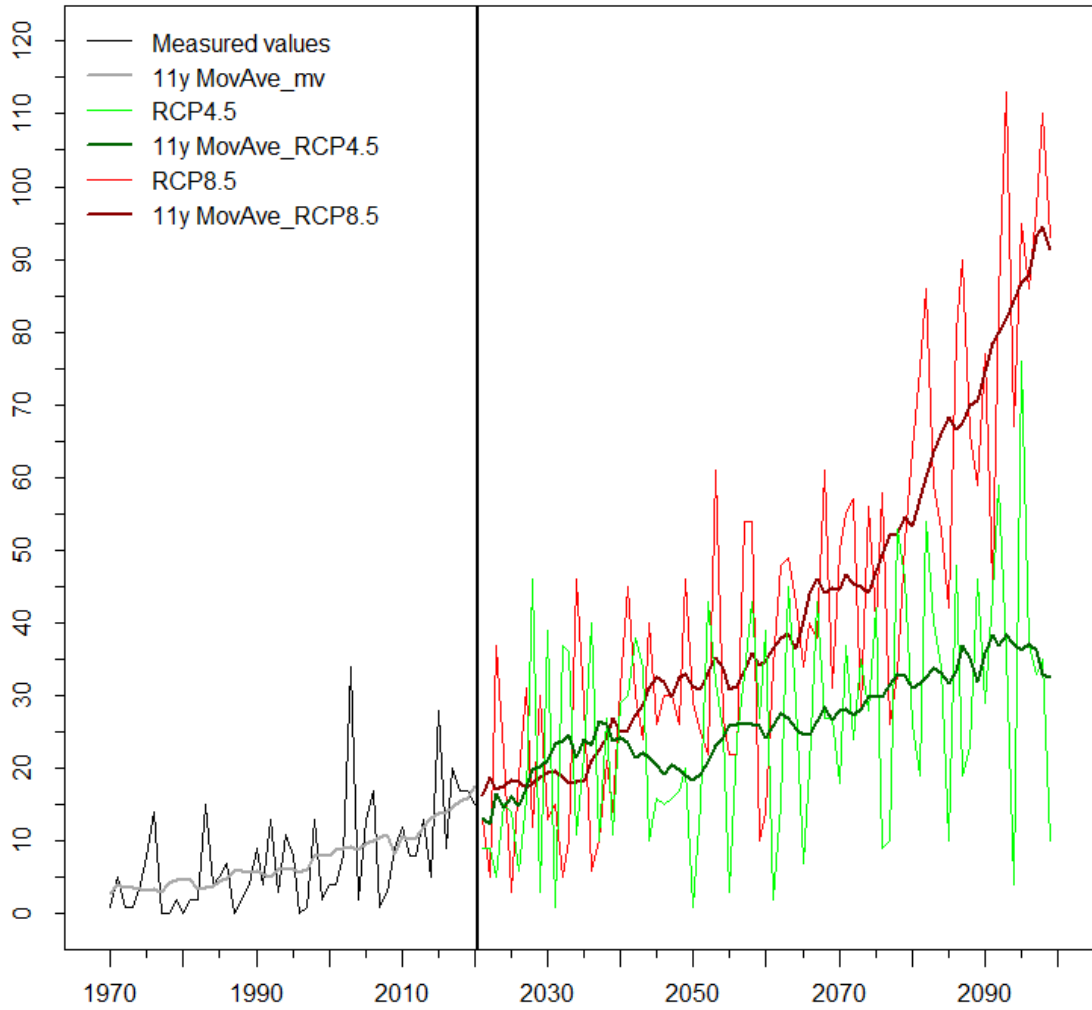
Annexe 4. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR11.



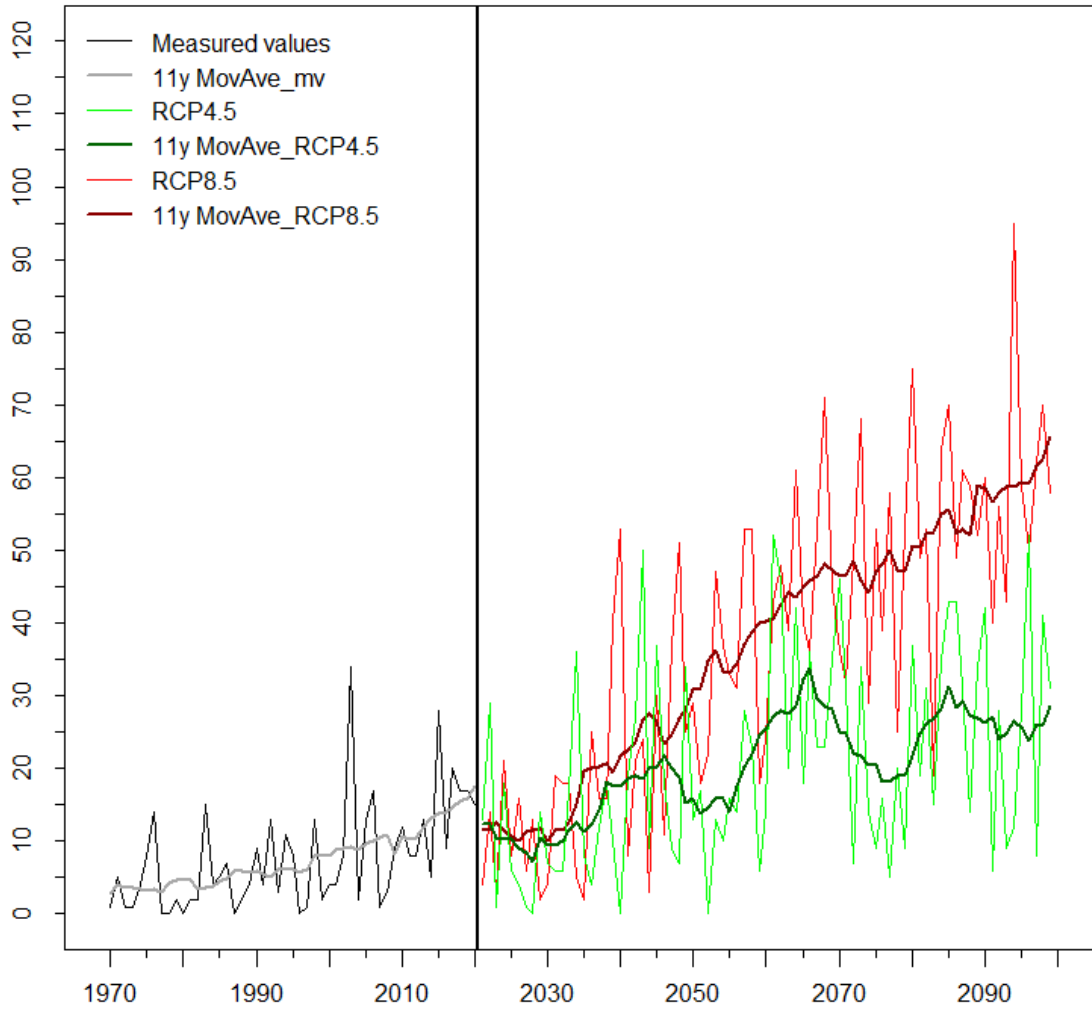
Annexe 5. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_NORESM_EUR44.



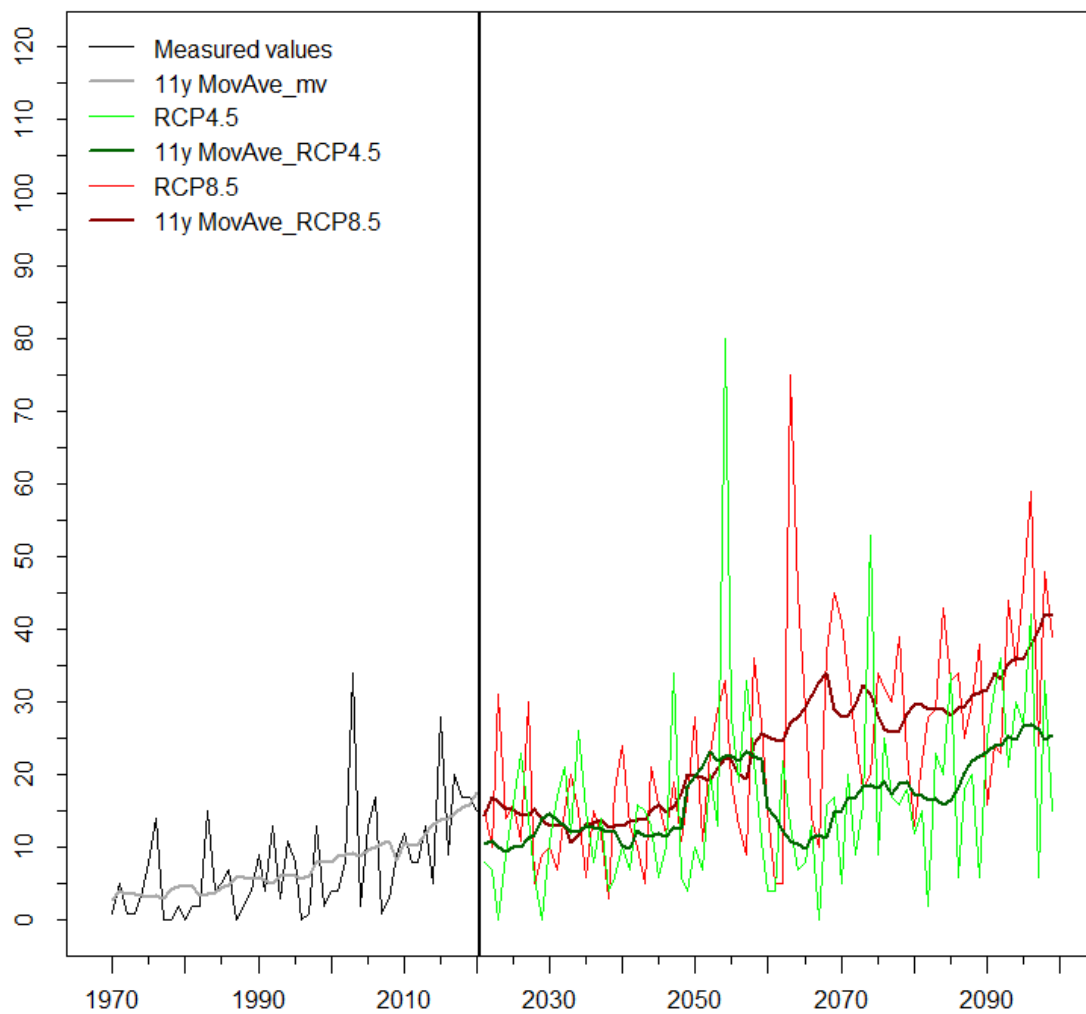
Annexe 6. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_MIROC_EUR44.



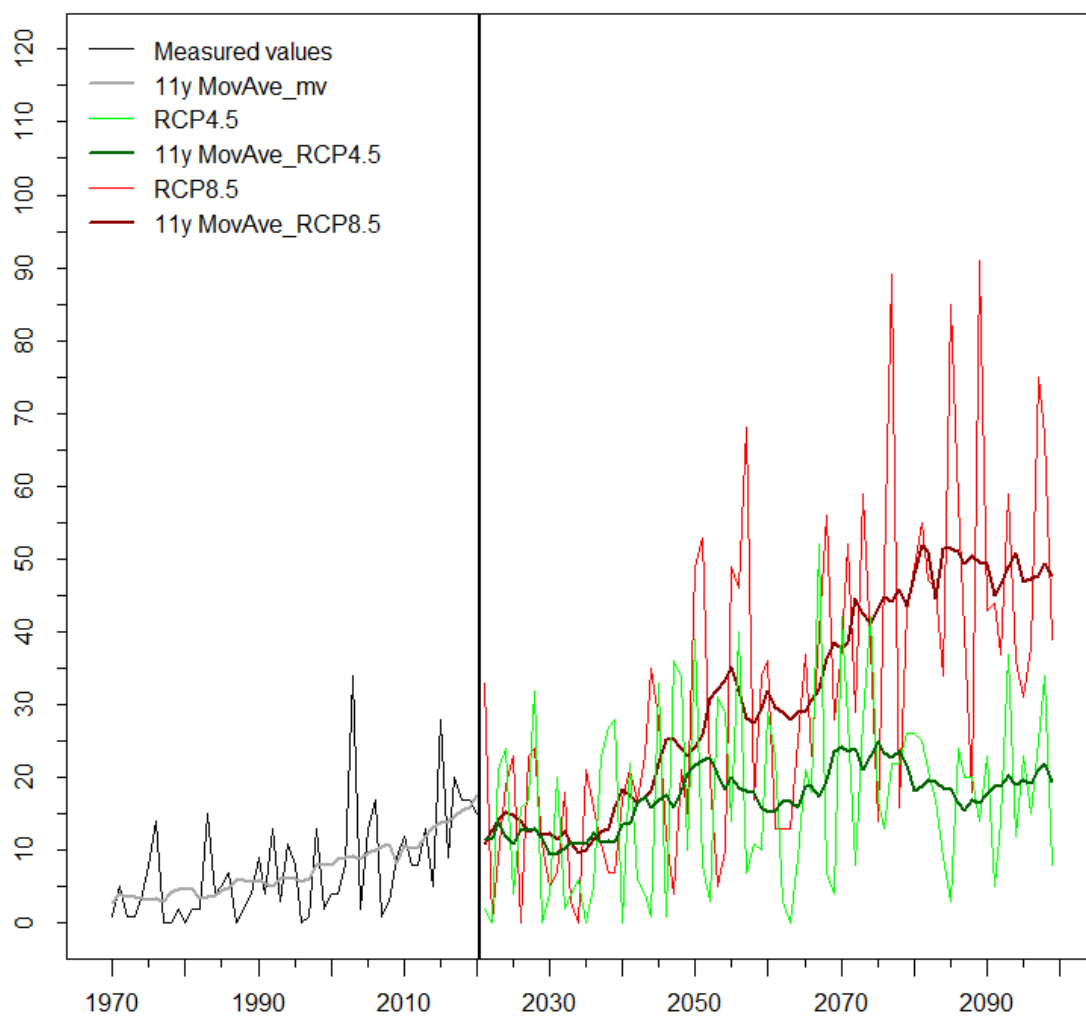
Annexe 7. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_CCCMA_EUR44.



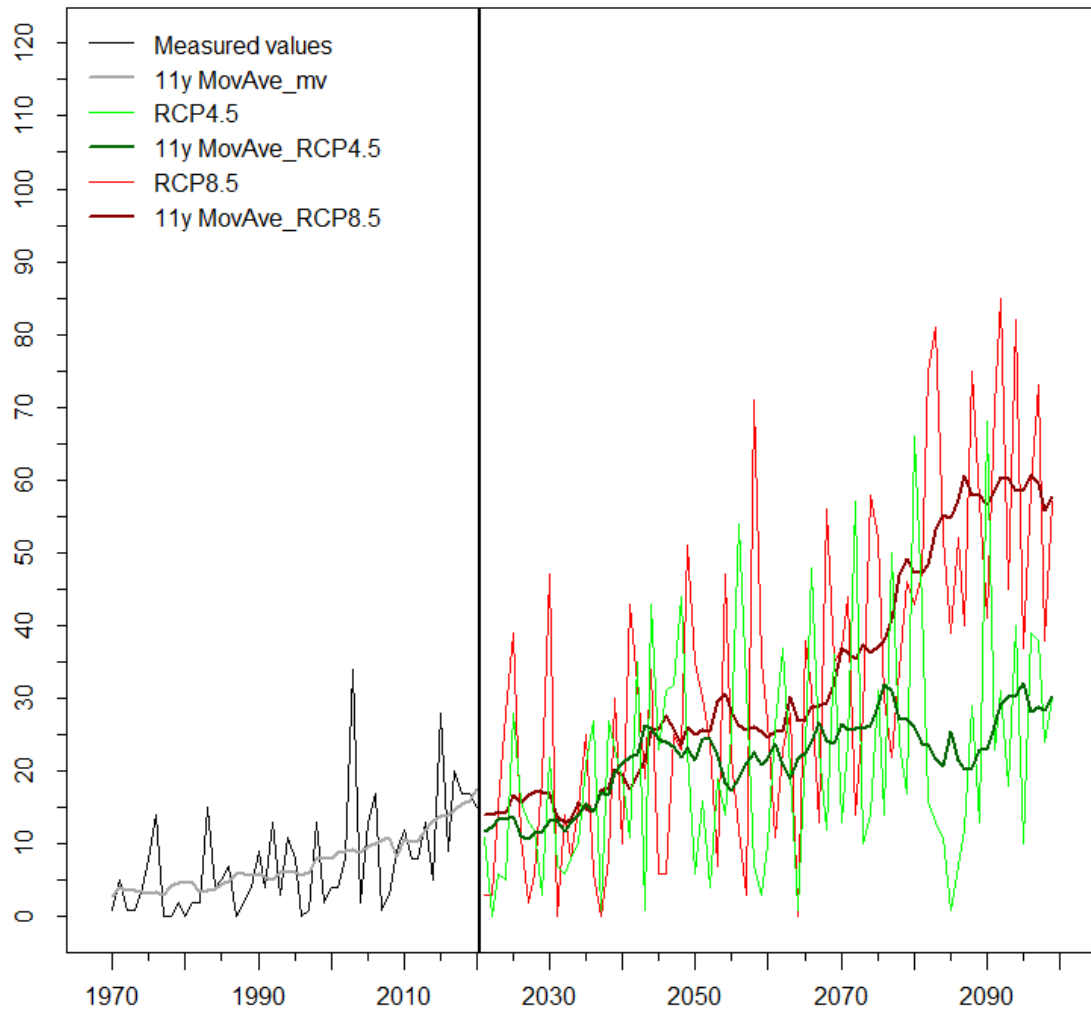
Annexe 8. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_CSIRO_EUR44.



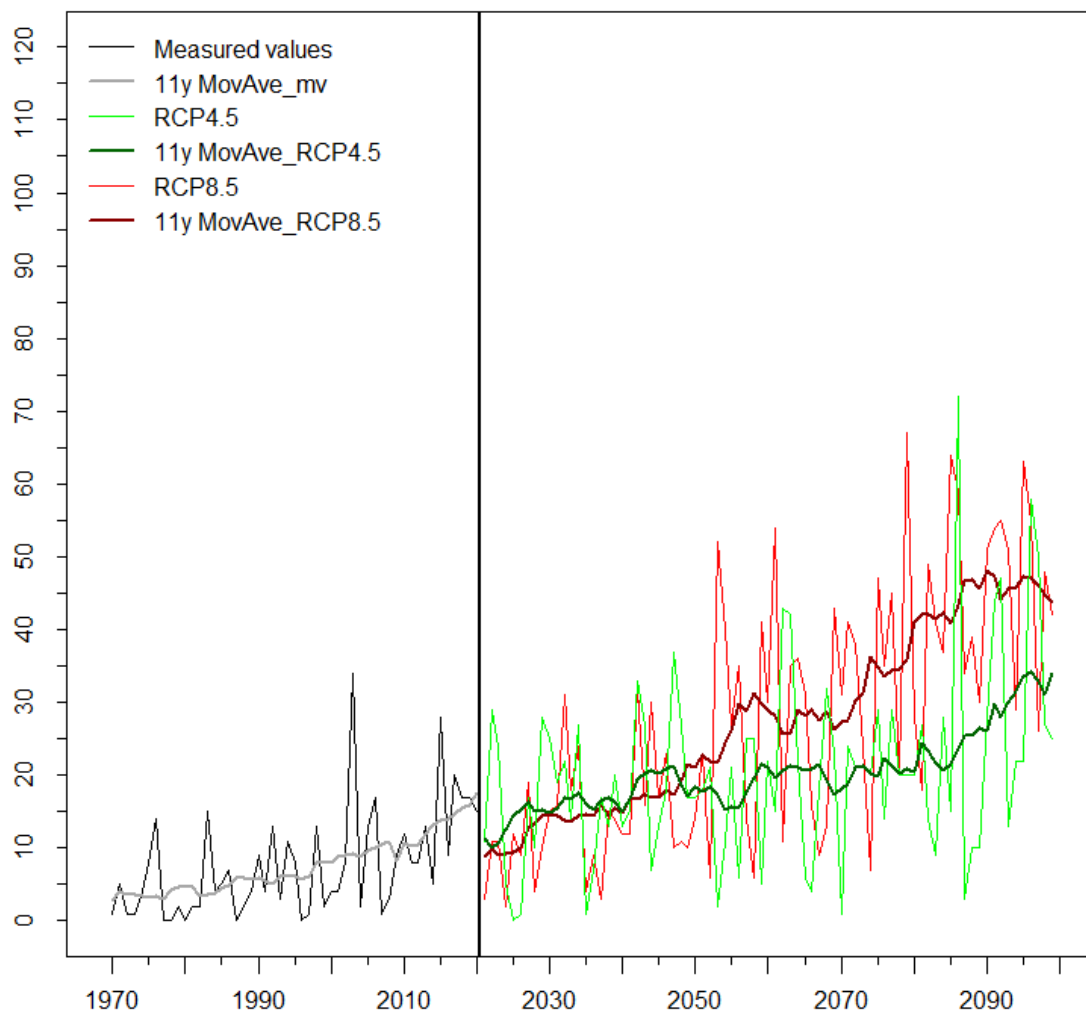
Annexe 9. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_GFDL_EUR44.



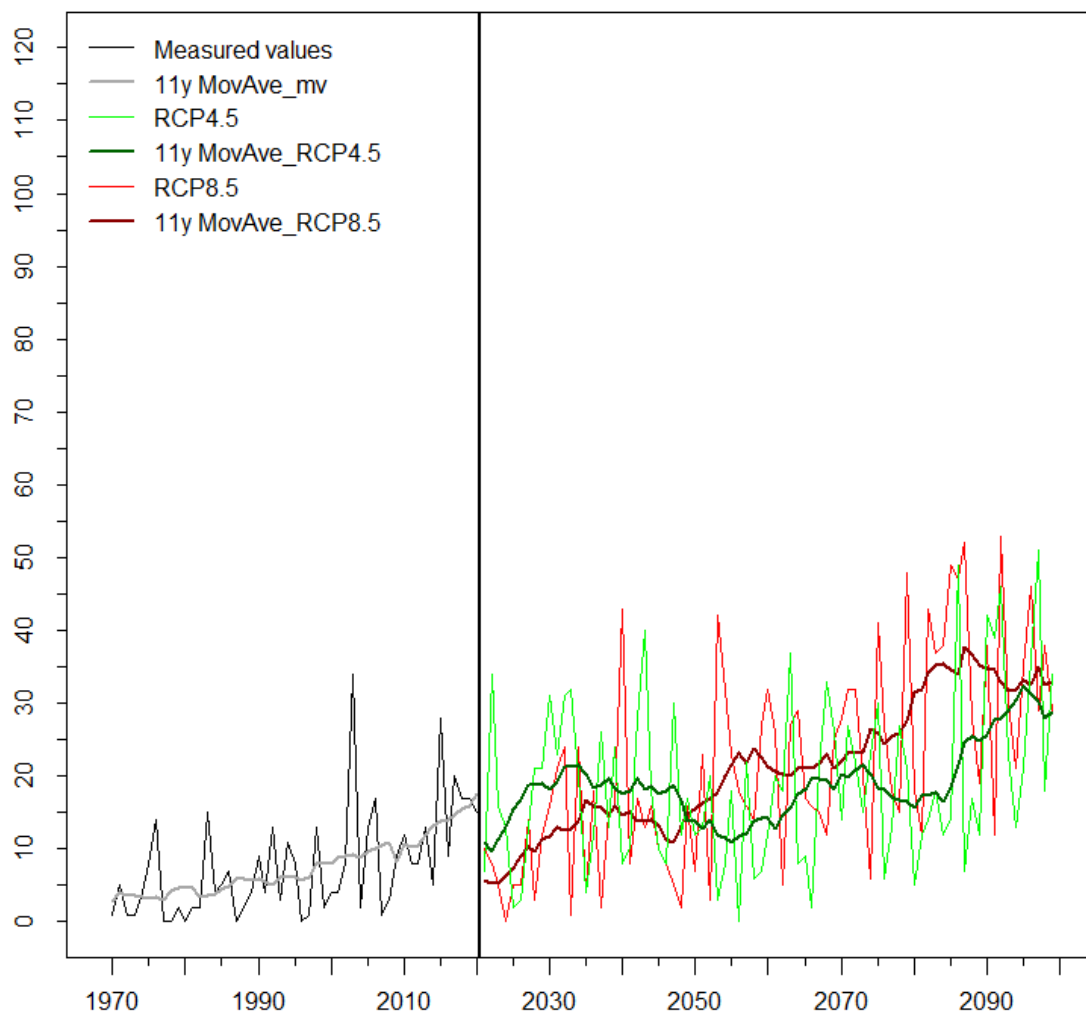
Annexe 10. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_IPSL_EUR11.



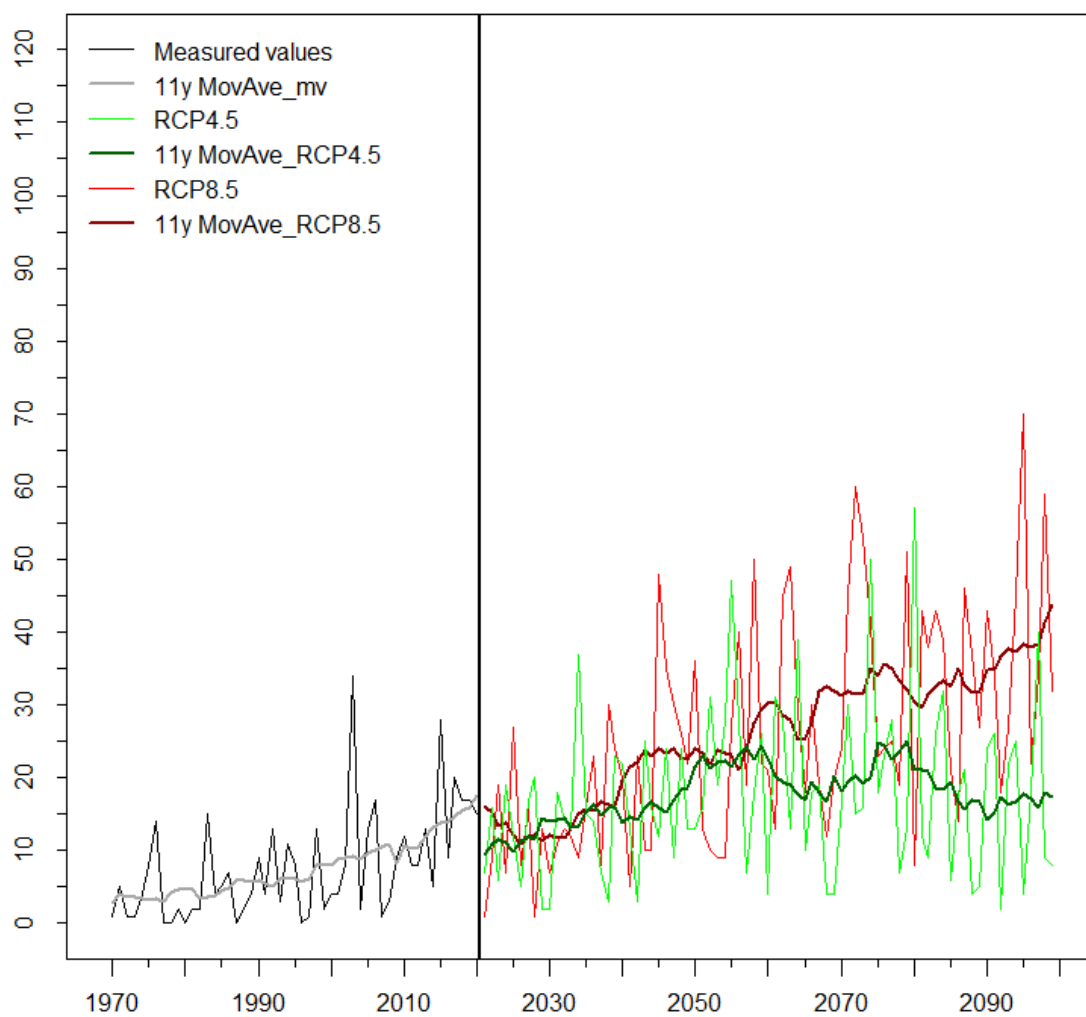
Annexe 11. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_HADGEM_EUR11.



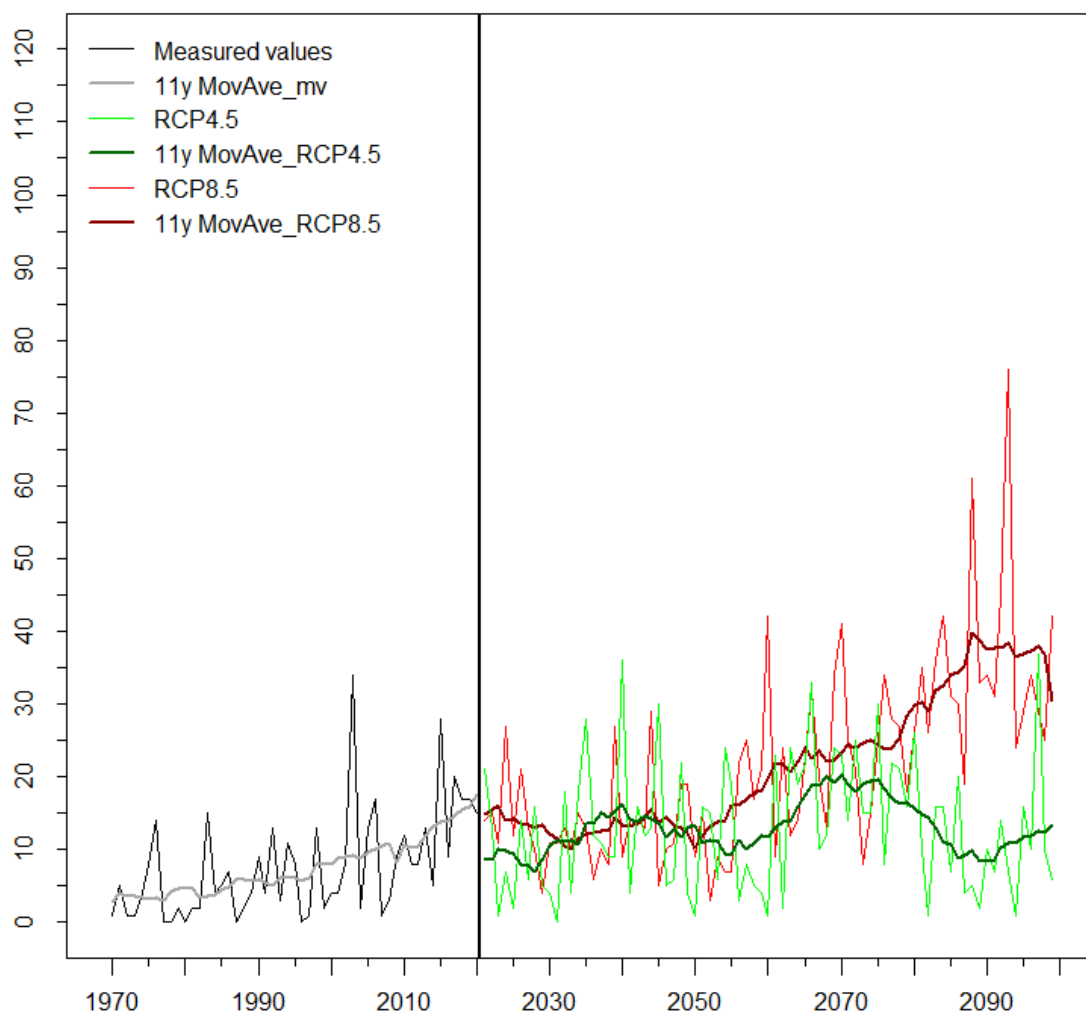
Annexe 12. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_MPIESM_EUR11.



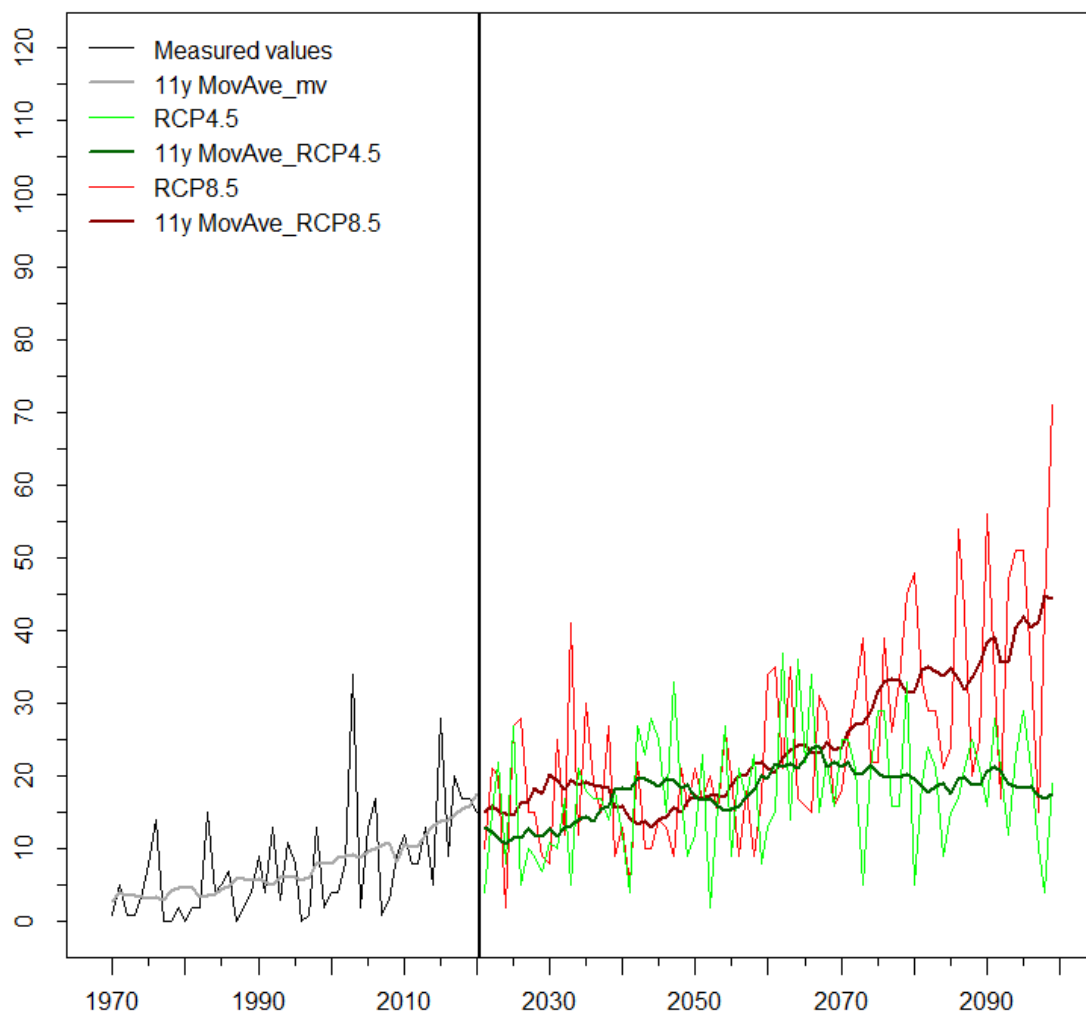
Annexe 13. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR44.



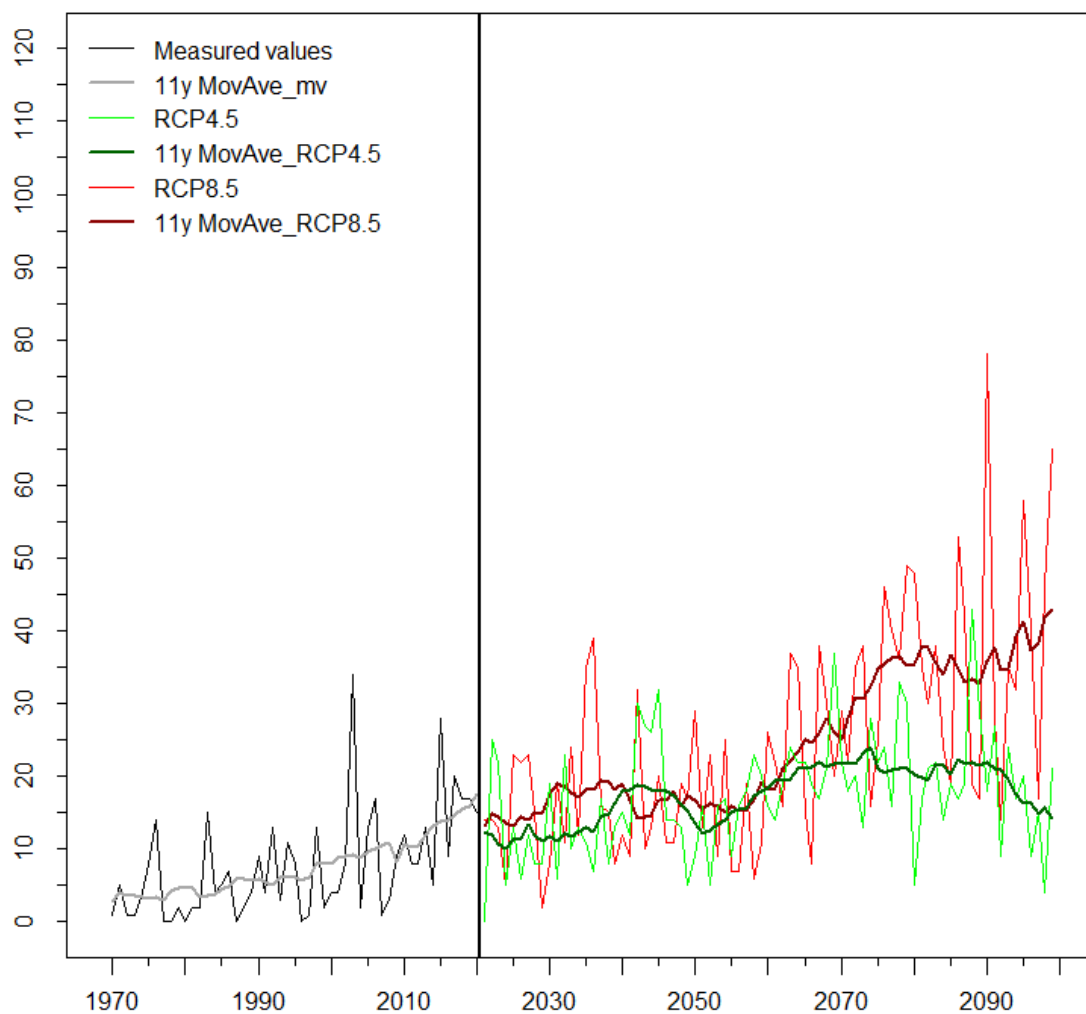
Annexe 14. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11.



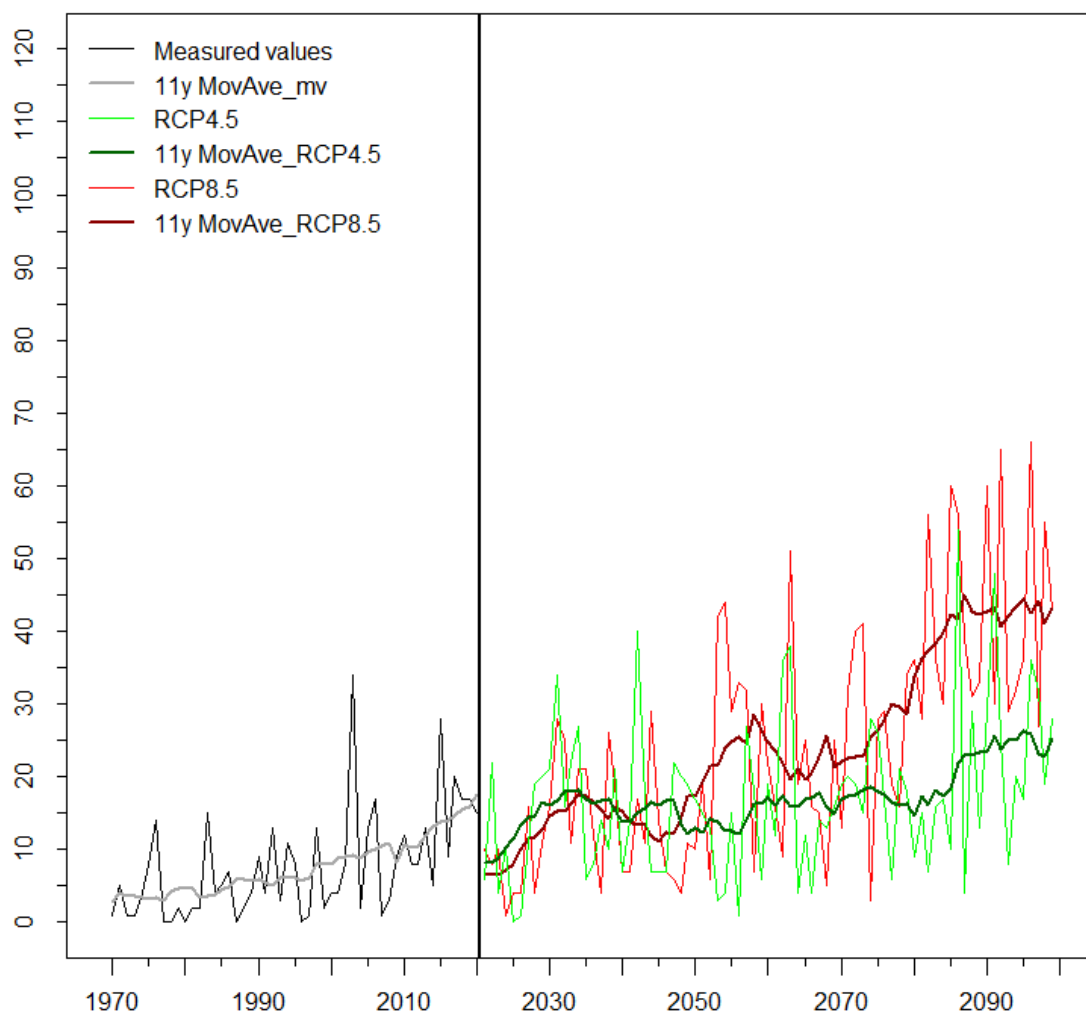
Annexe 15. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44.



Annexe 16. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44.

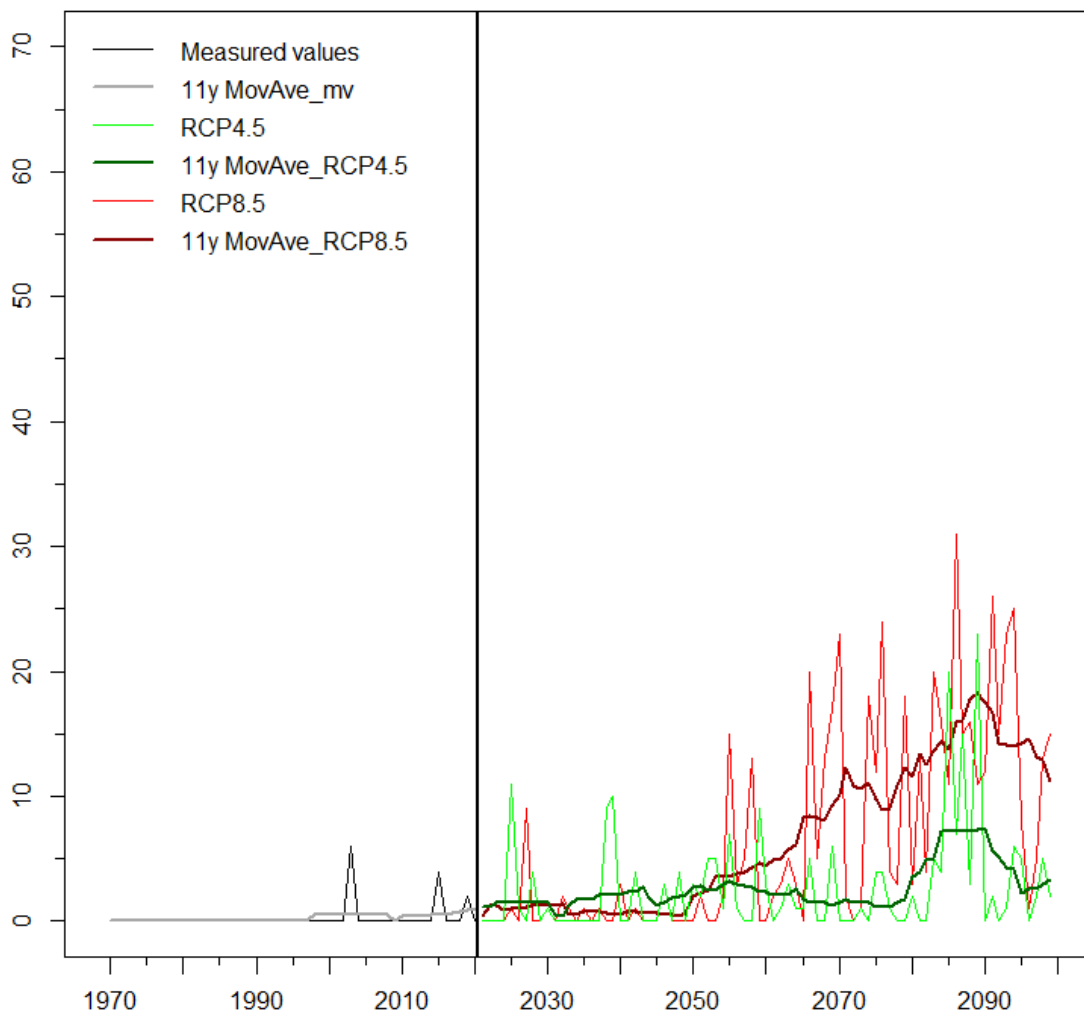


Annexe 17. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données DMI-HIRAM_ECEARTH_EUR44.

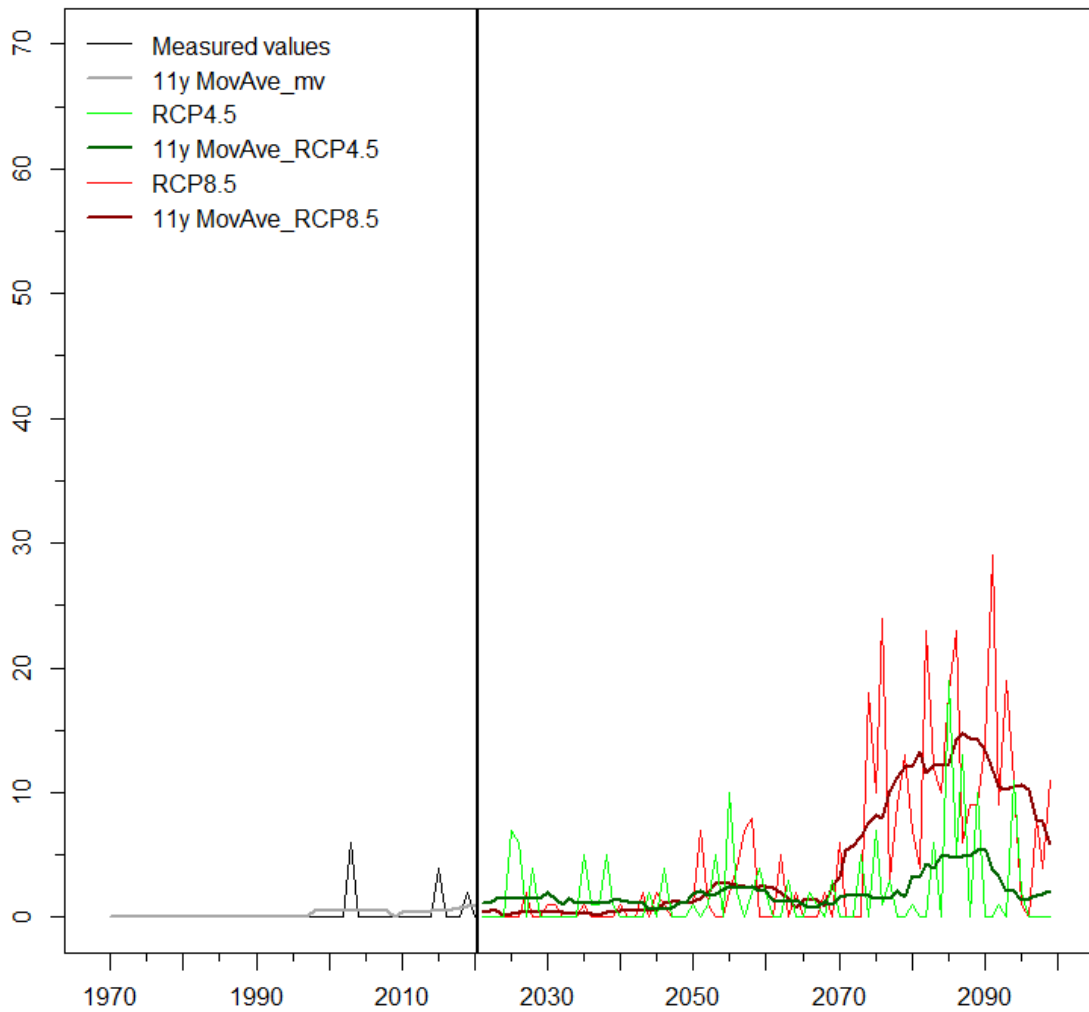


Annexe 18. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 30°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR11.

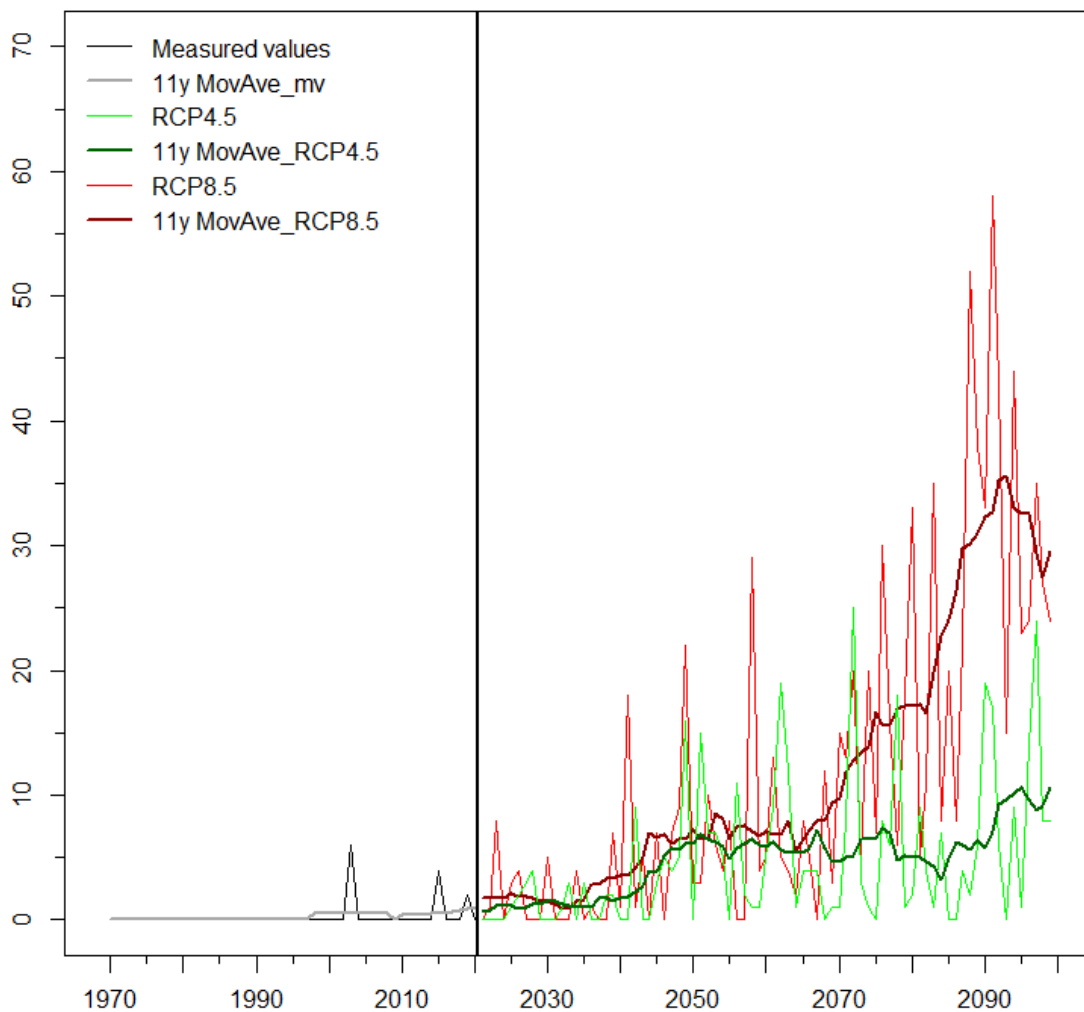
6.3. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C



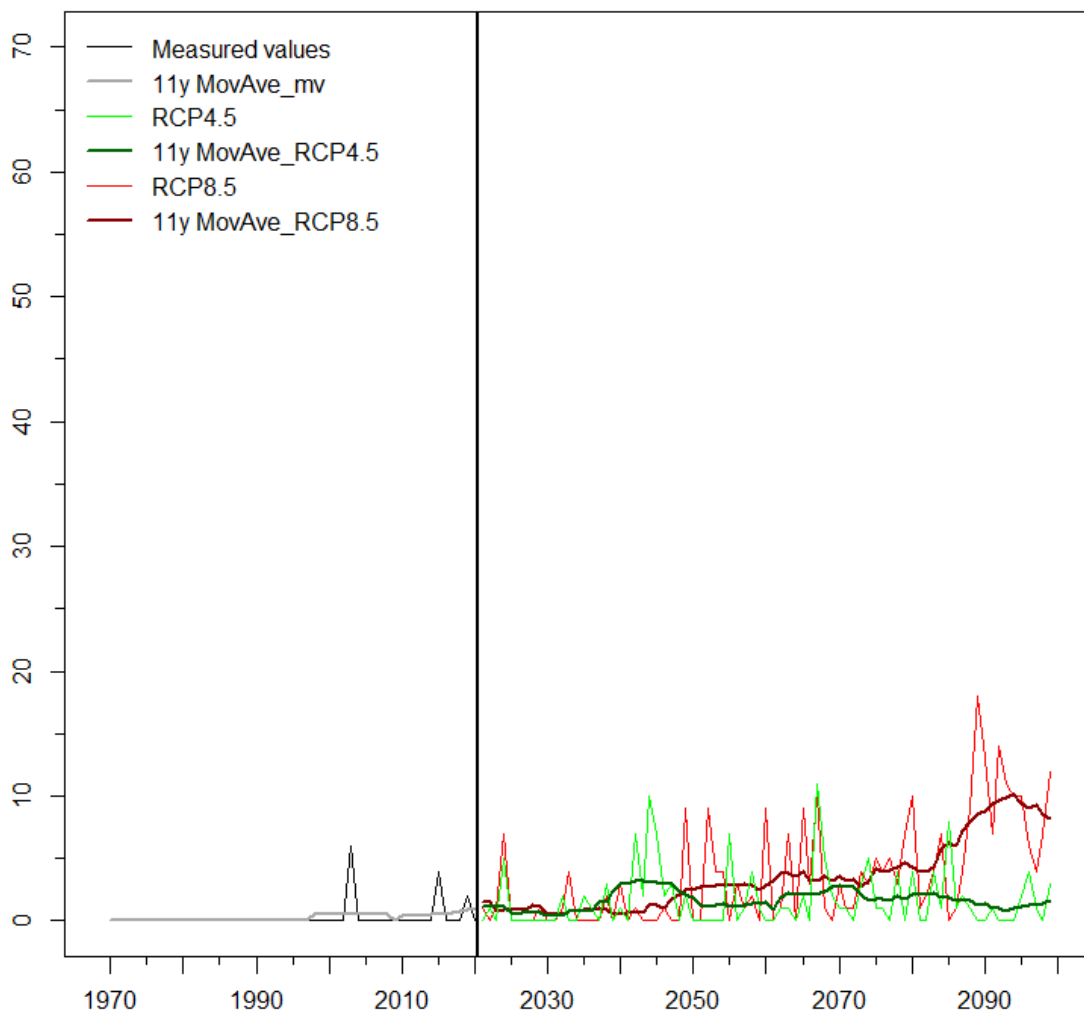
Annexe 19. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_ECEARTH_EUR11.



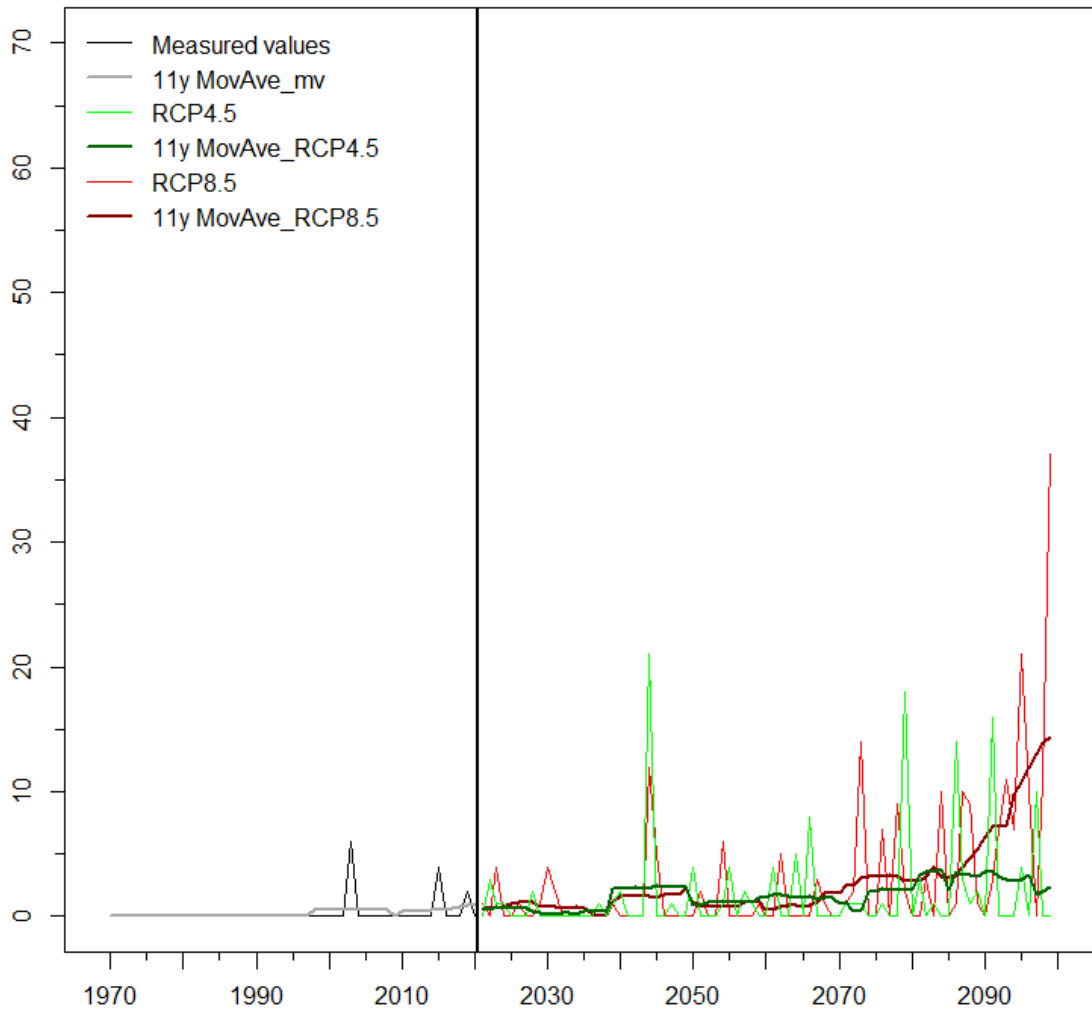
Annexe 20. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données CLMCOM-CCLM4_ECEARTH_EUR11.



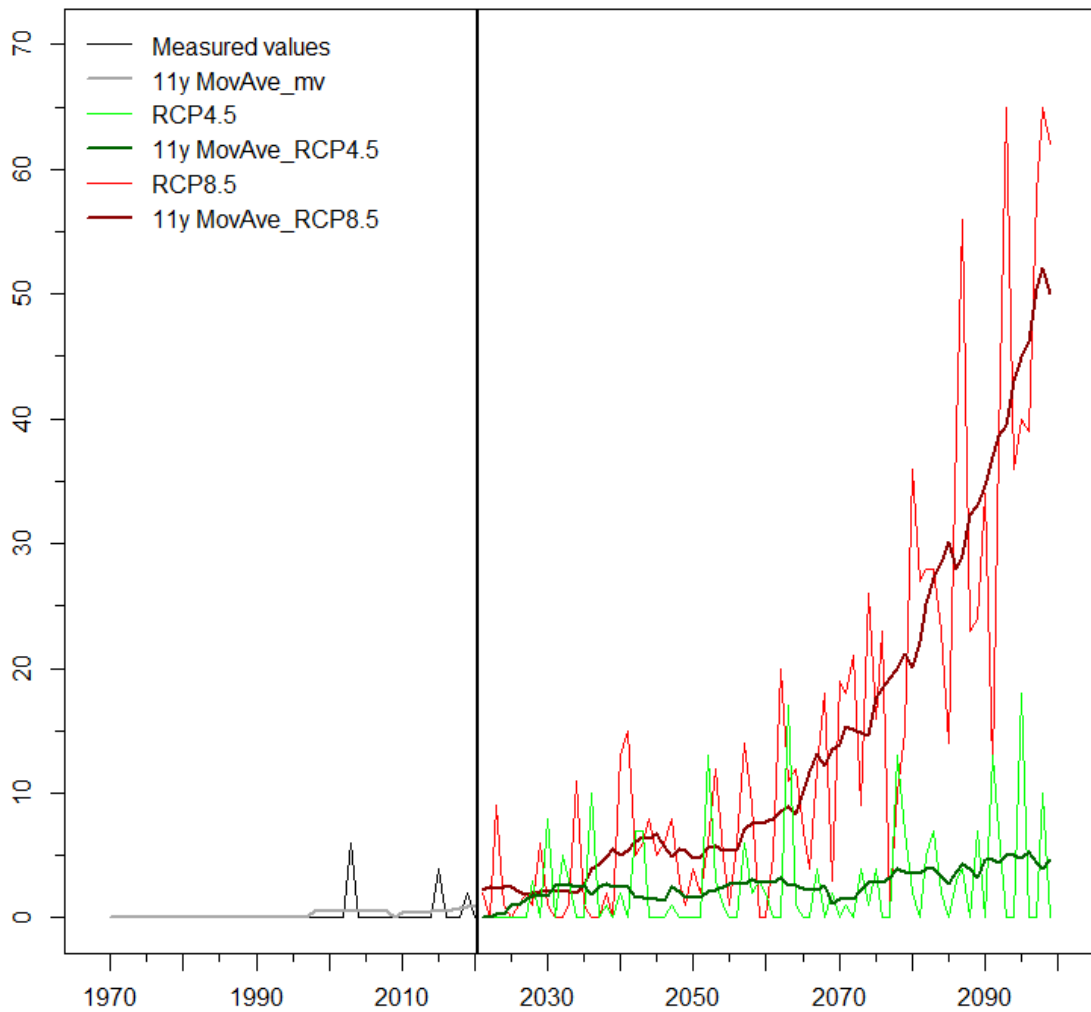
Annexe 21. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR11.



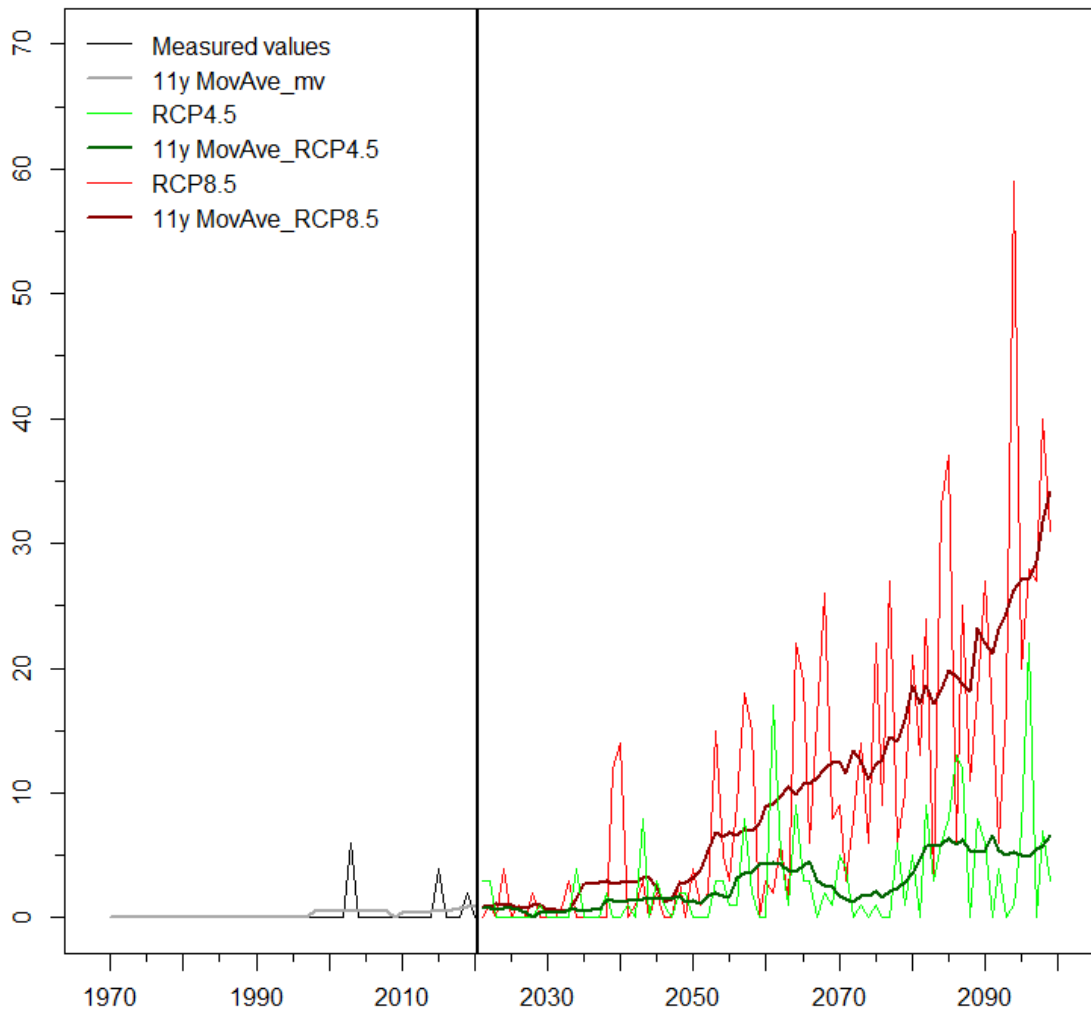
Annexe 22. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_NORESM_EUR44.



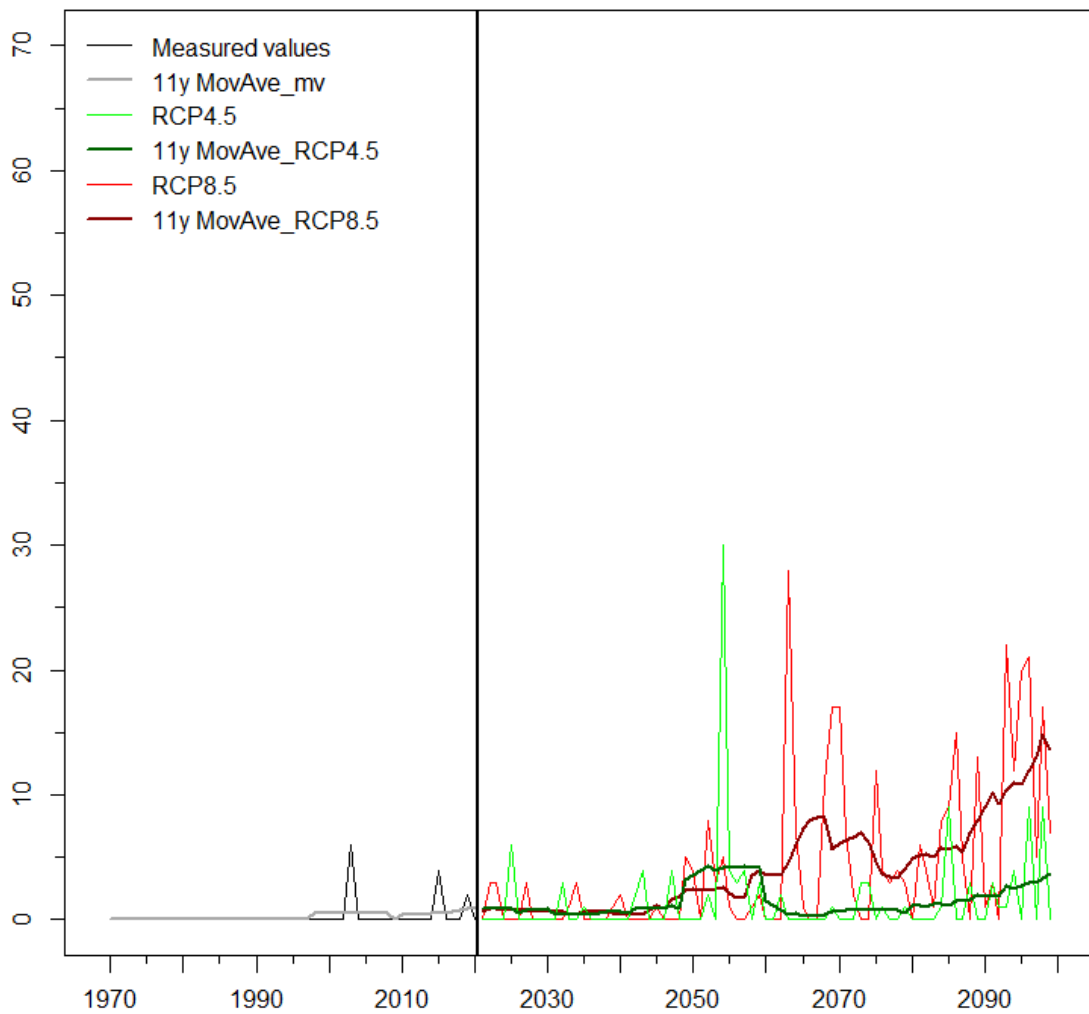
Annexe 23. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_MIROC_EUR44.



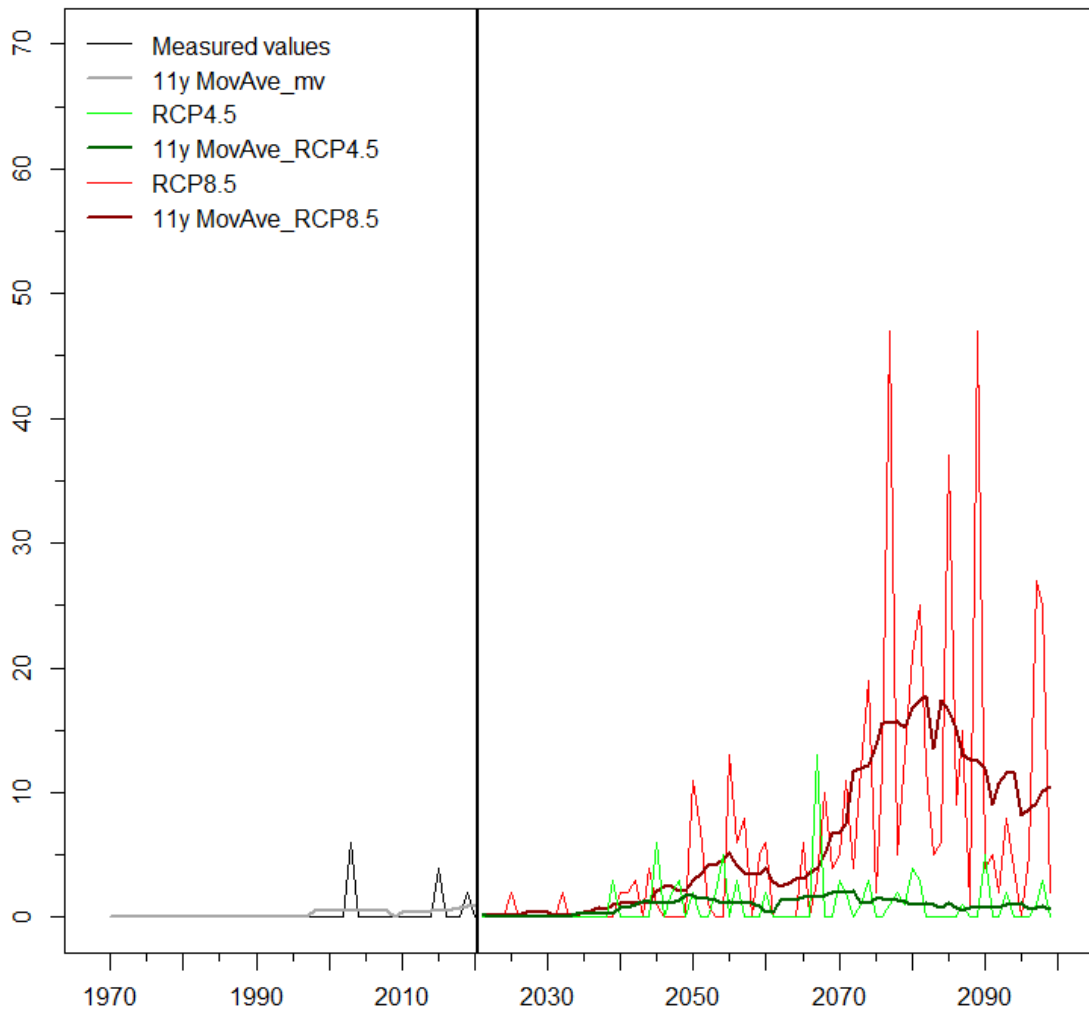
Annexe 24. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_CCCMA_EUR44.



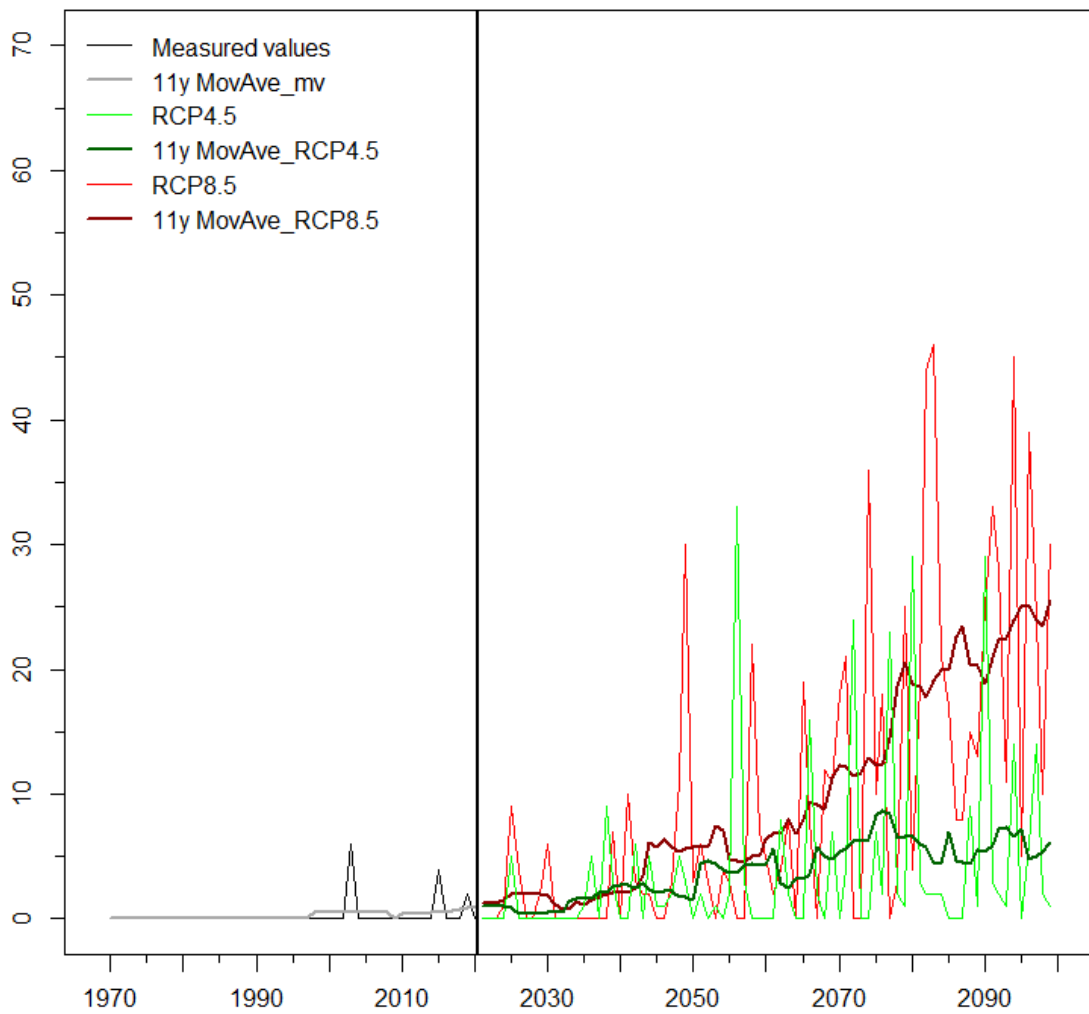
Annexe 25. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_CSIRO_EUR44.



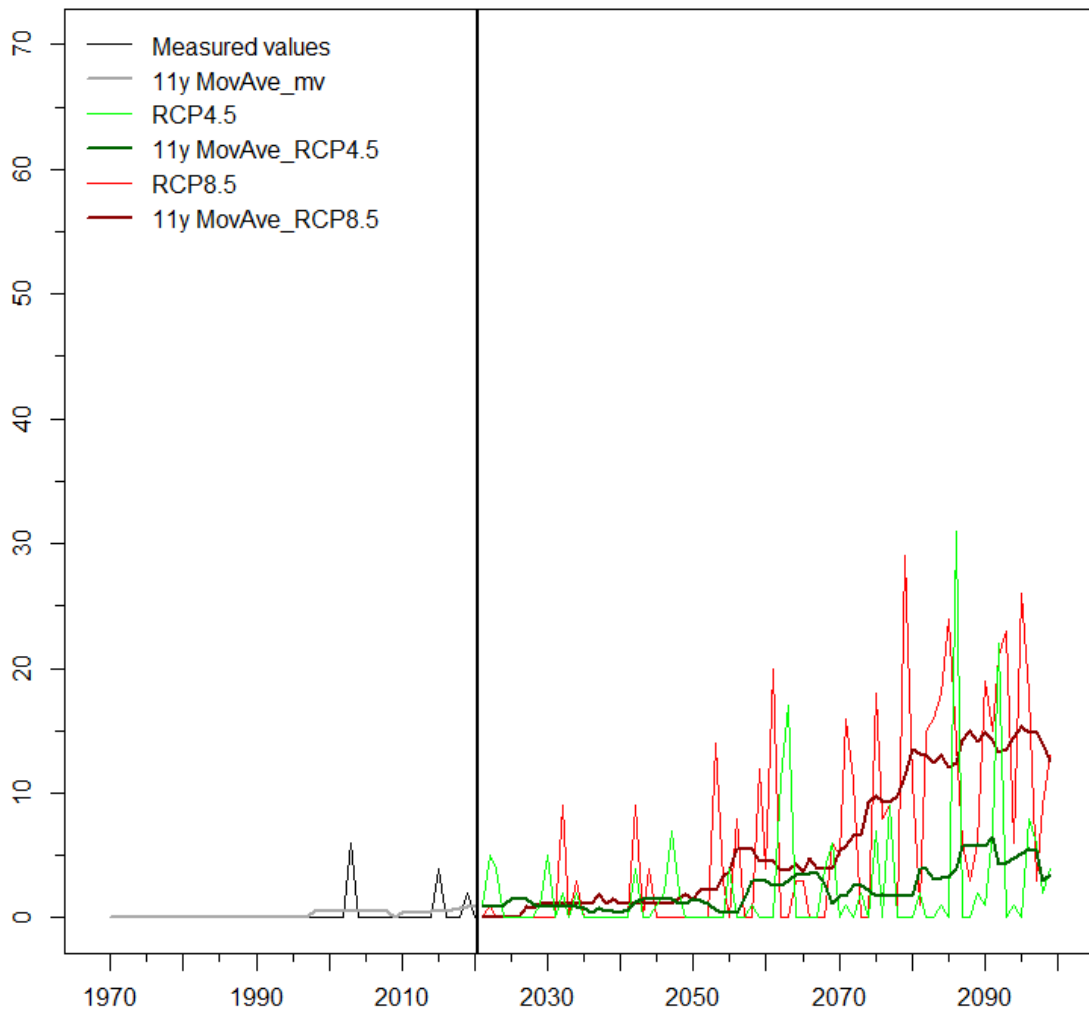
Annexe 26. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_GDFL_EUR44.



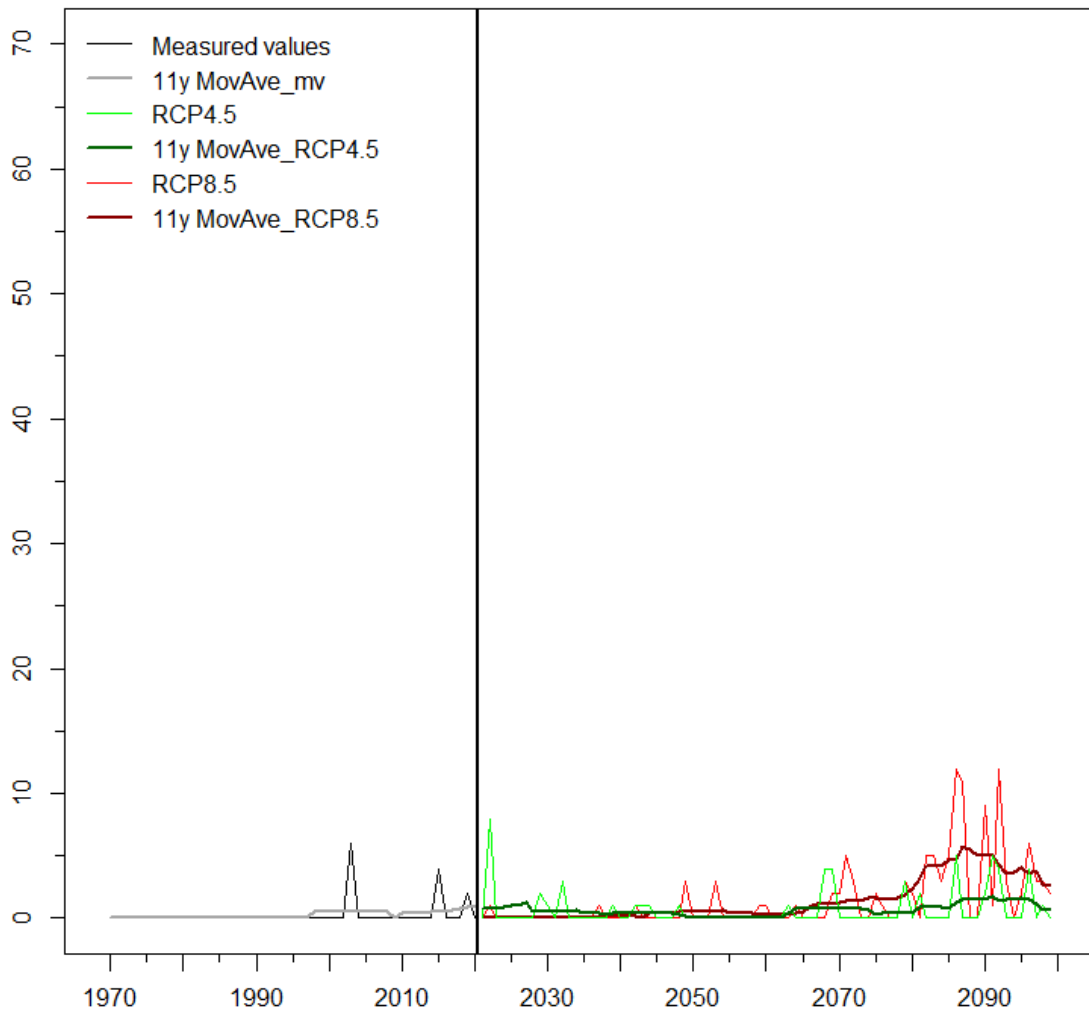
Annexe 27. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_IPSL_EUR11.



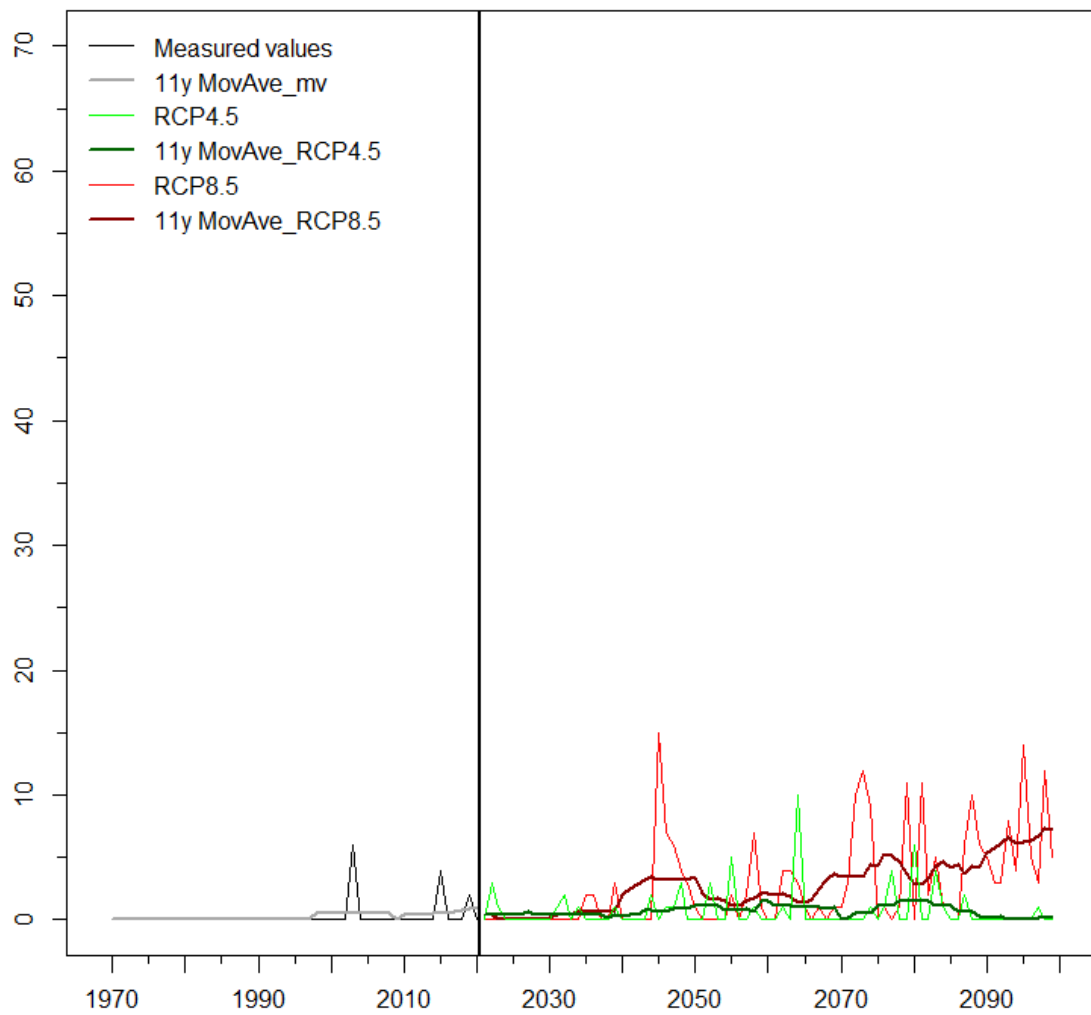
Annexe 28. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_HADGEM_EUR11.



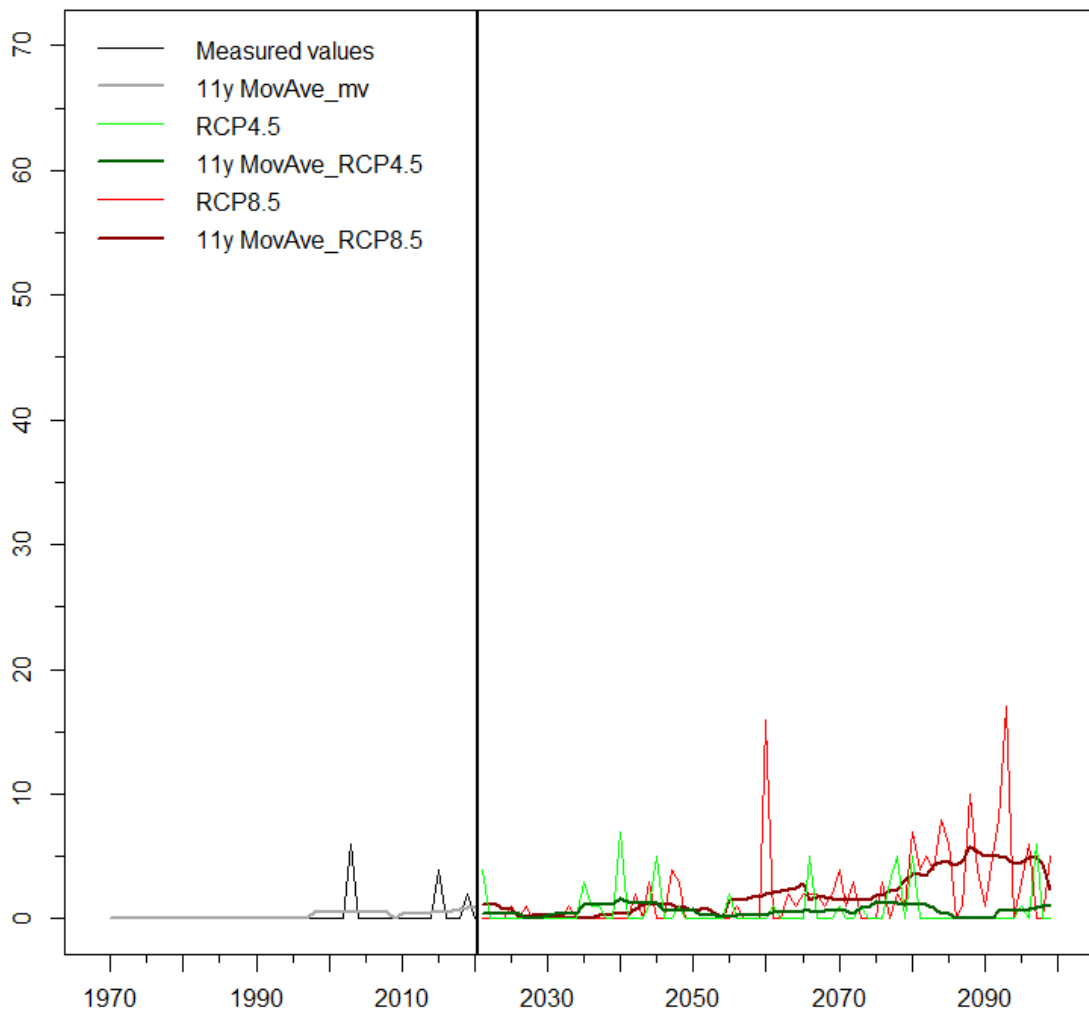
Annexe 29. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données SMHI-RCA4_MPIESM_EUR11.



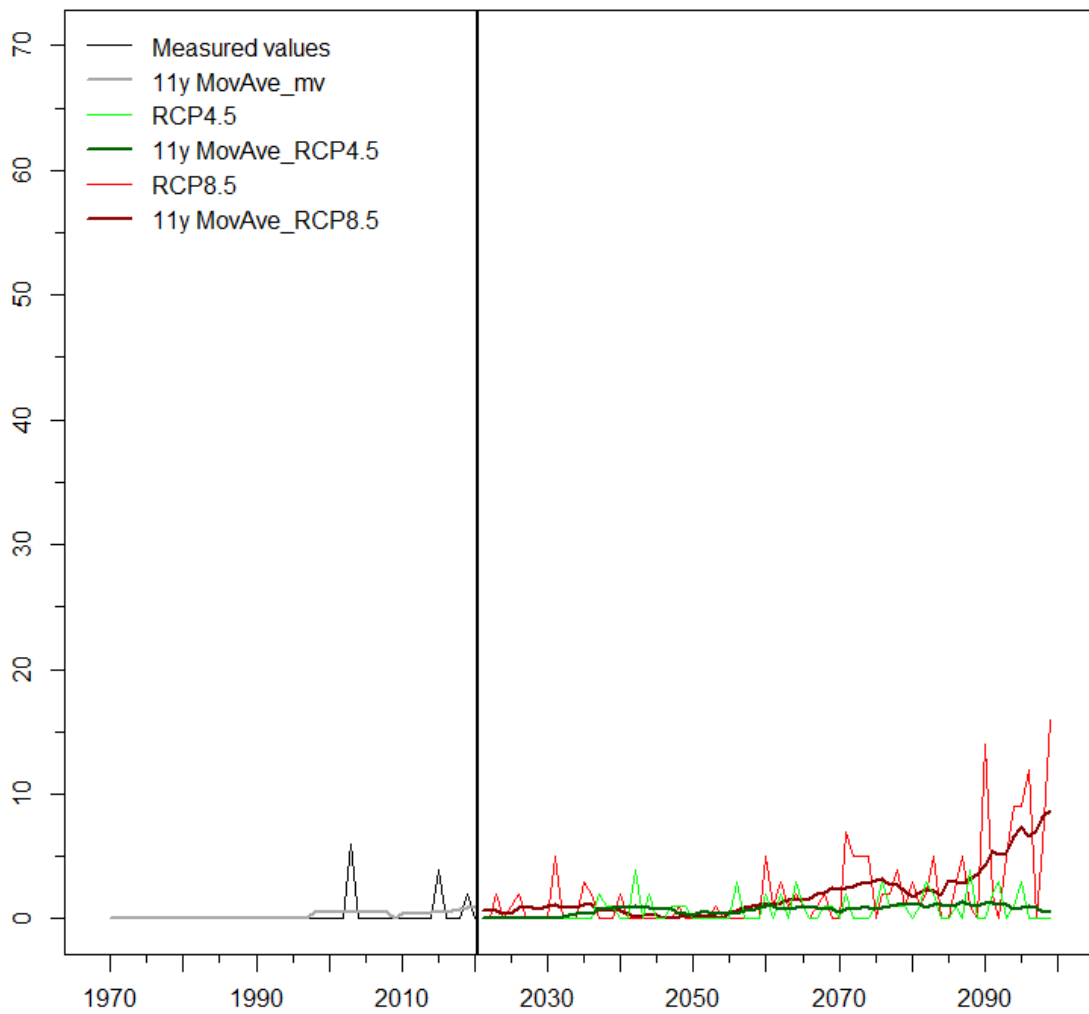
Annexe 30. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR44.



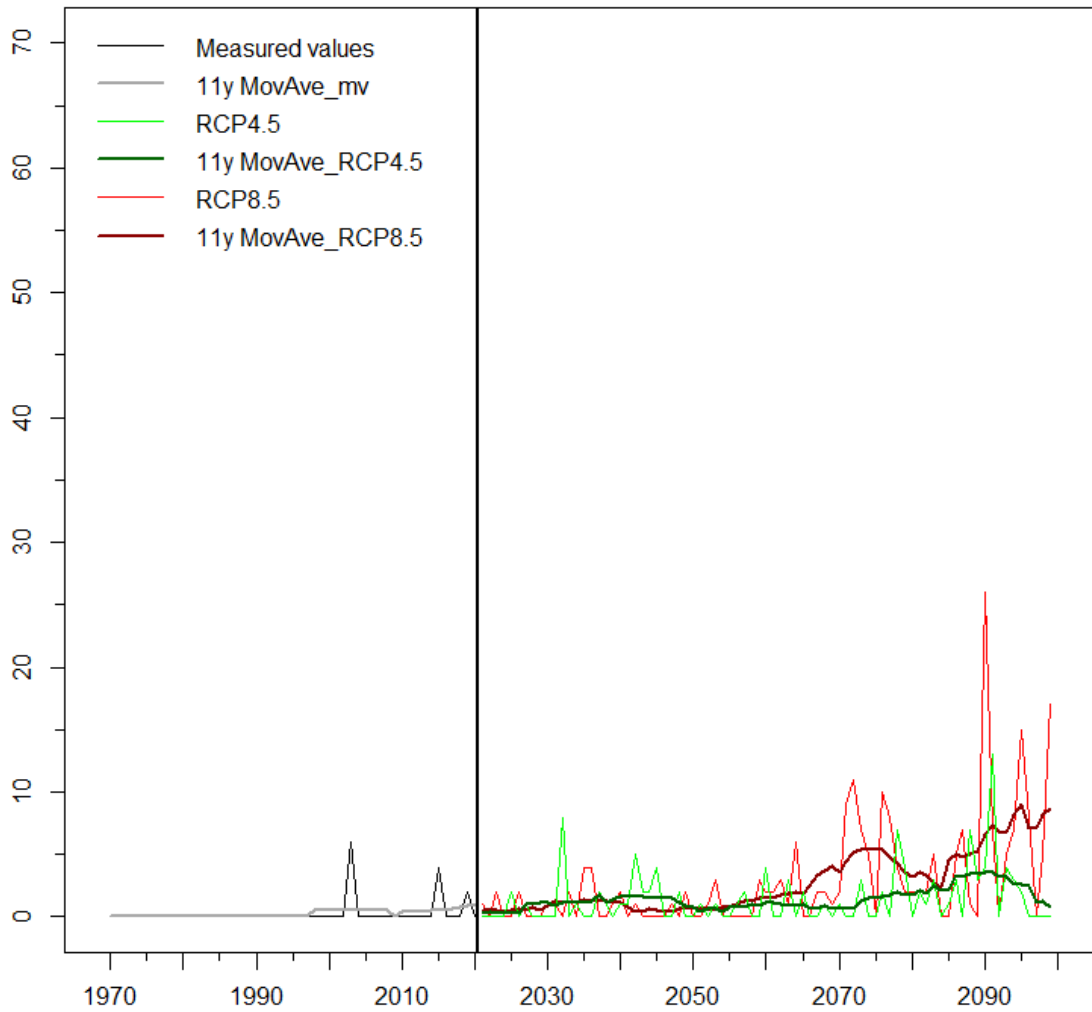
Annexe 31. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11.



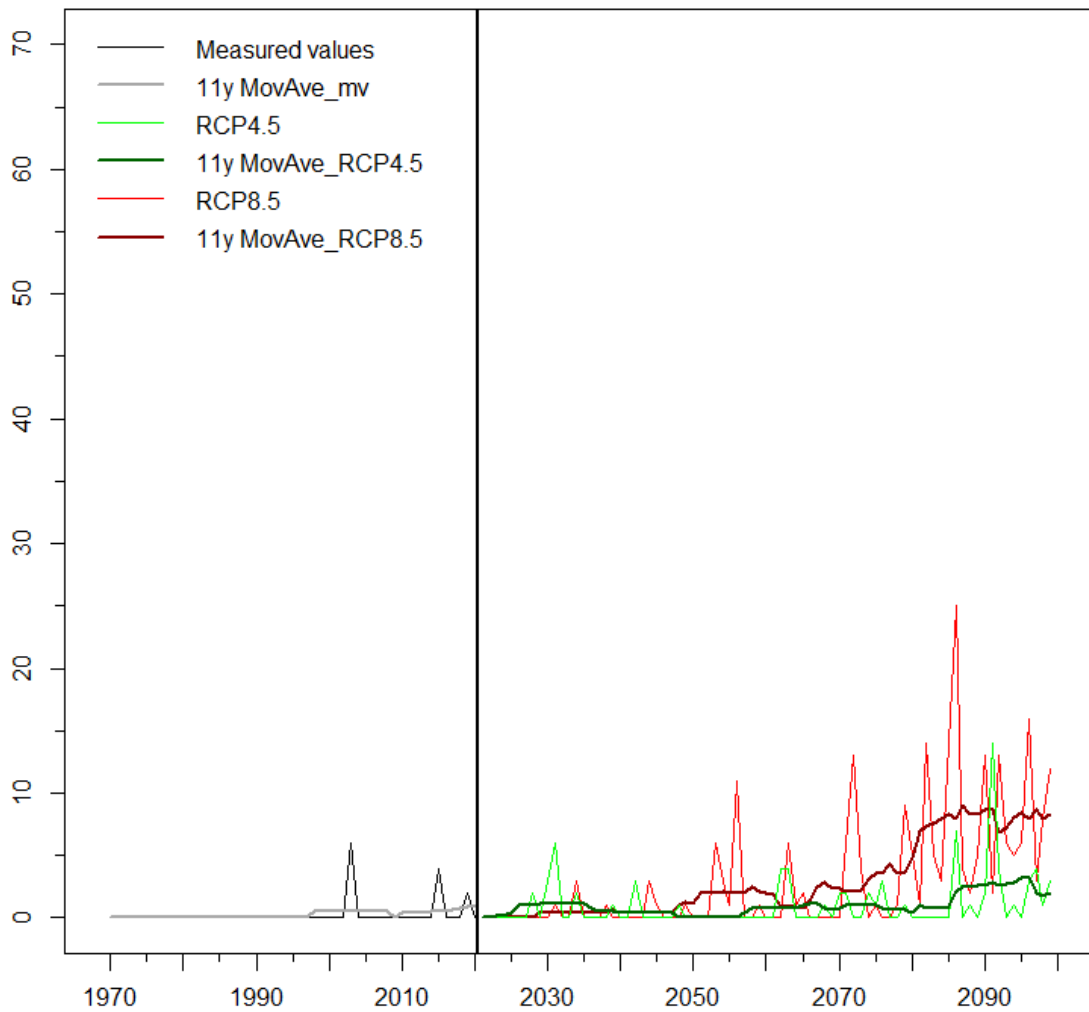
Annexe 32. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données Tx35 KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44.



Annexe 33. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données Tx35 KNMI-RACMO_HADGEM_EUR11.

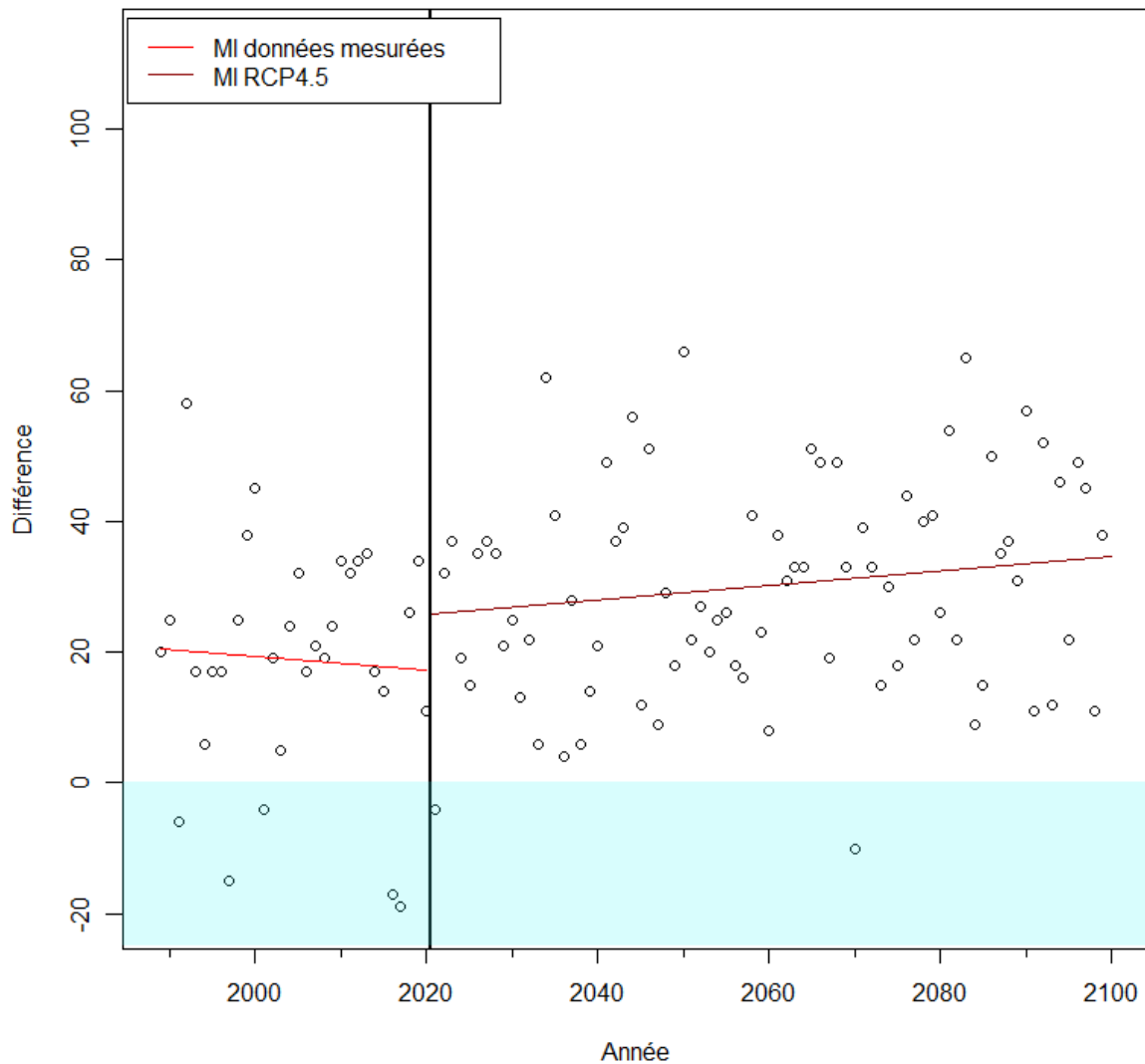


Annexe 34. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données Tx35 DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44.



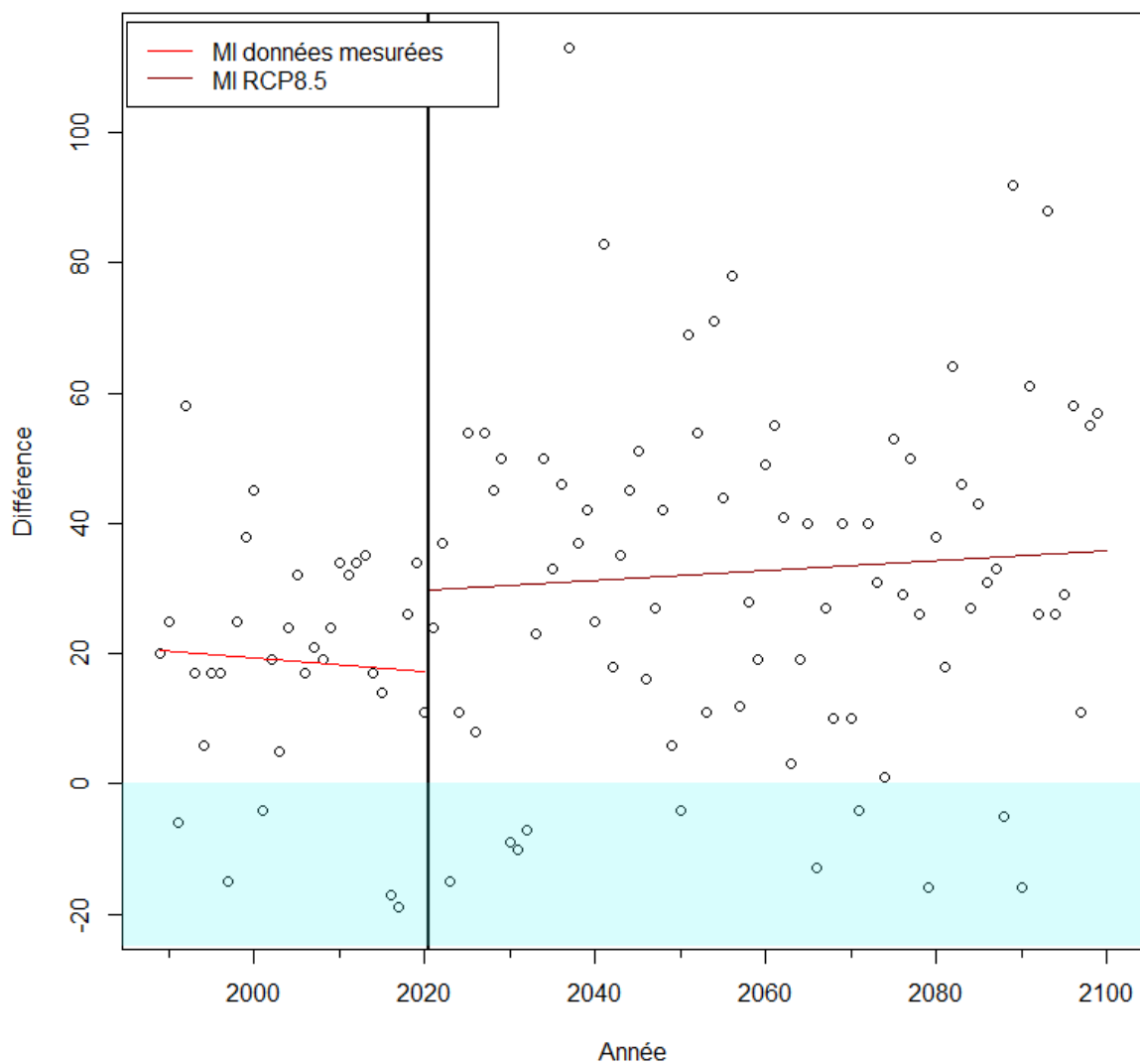
Annexe 35. Nombre de jours par an où le maxima journalier dépasse le seuil de 35°C, avec les valeurs mesurées (1970 à 2020) et simulées (RCP4.5 et RCP8.5). MoyMob correspond aux moyennes mobiles sur 11 années. Résultats obtenus avec le jeu de données CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR11.

6.4. Risque de gel printanier pour le Pinot noir à Neuchâtel



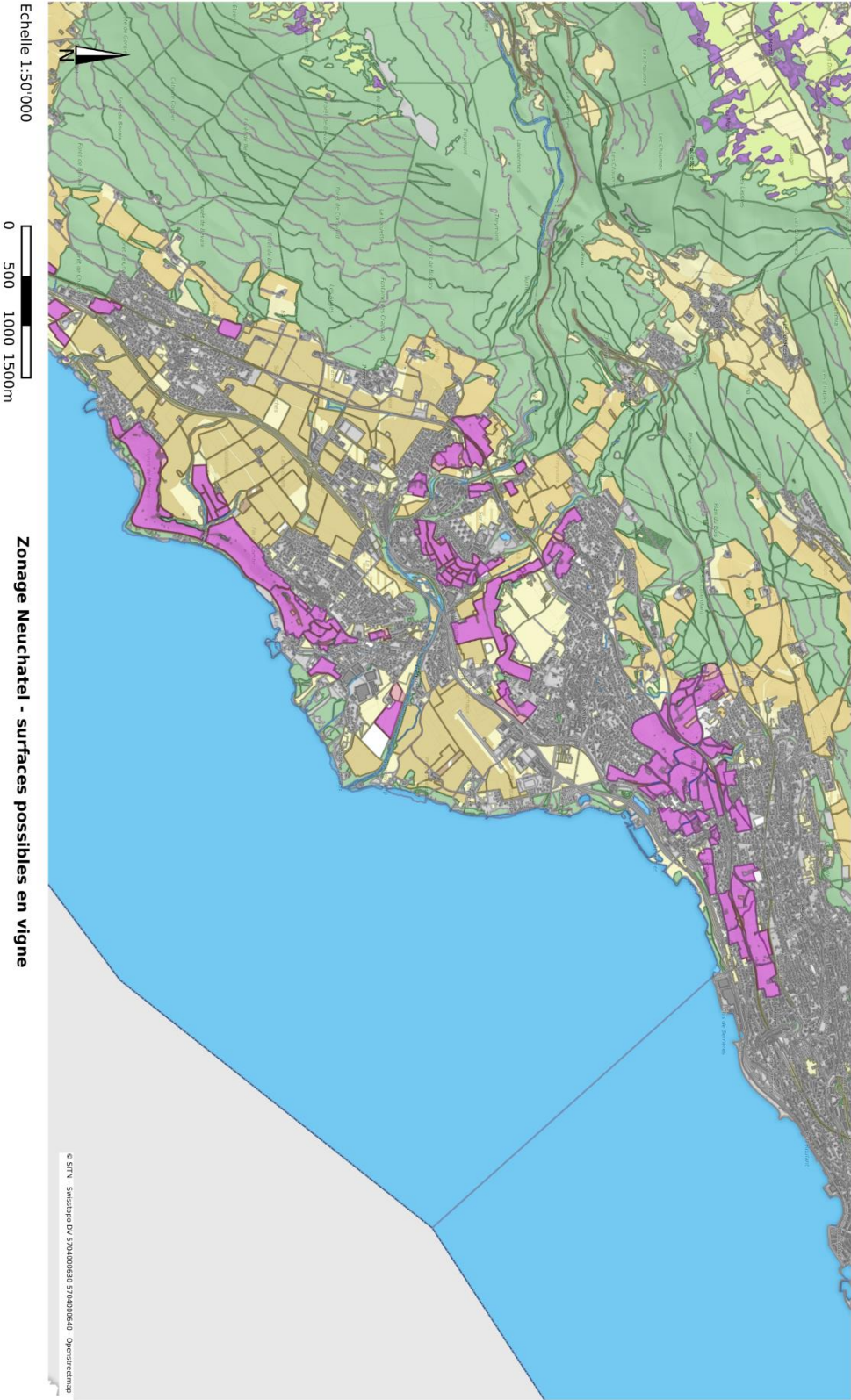
Annexe 36. Différence entre la date de débourrement et celle du dernier jour de gel.

Modélisation pour le futur avec le RCM SMHI-RCA4_ECEARTH_EUR11 pour le scénario RCP4.5. Les modèles linéaires n'indiquent aucune tendance à la hausse ou à la baisse de ce risque ($p > 0.1$).



Annexe 37. Différence entre la date de débourrement et celle du dernier jour de gel. Modélisation pour le futur avec le RCM SMHI-RCA4_ECEARTH_EUR11 pour le scénario RCP8.5. Les modèles linéaires n'indiquent aucune tendance à la hausse ou à la baisse de ce risque ($p > 0.1$).

6.5. Carte de l'utilisation du sol autour de la commune de Milvignes, dans le littoral neuchâtois



Informations dépourvues de foi publique. Bien que ces renseignements aient été recueillis avec soin, aucune garantie n'est donnée quant à l'exactitude et la mise à jour des données de cette carte ou ce plan.

Annexe 38. Utilisation du sol autour de la commune de Milvignes.

Source : www.sitn.ch

Légende de la carte :

Surfaces agricoles utiles

-  Accès, place
-  Cours d'eau
-  Eau stagnante
-  Forêt
-  Marais
-  Pâturage boisé
-  Pâturage
-  Pré-champ
-  Tourbière boisée
-  Tourbière

Niveau cantonal

Zones viticoles

-  Zones viticoles

Surfaces d'assolement

-  Bilan attesté - Catégorie 1
-  Bilan attesté - Catégorie 2
-  Bilan attesté - Catégorie 3
-  Cas spécial a - Catégorie 1
-  Cas spécial a - Catégorie 2
-  Cas spécial a - Catégorie 3
-  Potentiel a - Catégorie 1
-  Potentiel a - Catégorie 2
-  Potentiel a - Catégorie 3