



HAL
open science

Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux

Marine Marjou, Inaki Garcia de Cortazar Atauri

► **To cite this version:**

Marine Marjou, Inaki Garcia de Cortazar Atauri. Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux. [Rapport Technique] Inconnu. 2019. hal-02159616

HAL Id: hal-02159616

<https://hal.science/hal-02159616v1>

Submitted on 18 Jun 2019

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License



Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux

Marine Marjou
Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri
Mai 2019
US 1116 Agroclim



Collaboration de recherche avec partenaire socio-économique non subventionné - FC8683

DOI : 10.15454/1.5586048305359907E12

Document sous licence CC-by-SA 4.0

Comment citer ce document :

Marjou M., Garcia de Cortazar-Atauri, I. 2019. Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux. Rapport INRA. 94 pp. DOI : 10.15454/1.5586048305359907E12

Crédit image couverture : ODG Ventoux

Contact : Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri - inaki.garciadecortazar@inra.fr

Remerciements

M.M. : Je tiens à remercier l'unité Agroclim et plus particulièrement Iñaki pour la confiance qu'ils m'ont accordée sur ce projet ainsi qu'aux acteurs de l'ODG Ventoux avec qui j'ai pu converser. Un énième rapport sur le changement climatique pourrait-on dire mais un énième rapport décrivant les réels changements climatiques que nous avons connus et que nous allons connaître dans les années à venir sur la belle région du Ventoux.

I.G.C.A. : Je tiens à remercier Marine pour cette collaboration qui a été très enrichissante pour moi en ce qui concerne le codage et la gestion des données sur R. Je tiens aussi à remercier mes collègues d'Agroclim sans lesquels ce rapport n'aurait pas pu voir le jour. Ils ont tous participé de loin ou de près à la conception des outils, gestion des données et à leur analyse. Enfin, je tiens à remercier les vignerons et professionnels de l'ODG Ventoux pour leur confiance dans la gestion et l'élaboration de ce rapport. J'espère que, malgré sa complexité technique, ce rapport va les aider à la compréhension de la richesse de leur territoire et à préparer au mieux leur avenir face aux enjeux futurs.

Préambule

Ce travail est le fruit des interrogations communes de l'Organisme de Gestion Ventoux et des scientifiques de l'INRA concernant l'évolution passée et future d'un territoire avec une production agricole bien identifiée, la viticulture.

Le double objectif de ce travail a été:

- d'explorer les potentialités des outils développés par l'Unité de Service Agroclim du Centre de recherches de l'INRA d'Avignon pour caractériser les impacts du changement climatique passés et futurs sur les différentes productions agricoles ;
- tout en se focalisant sur la caractérisation de l'évolution du climat et les risques associés dans un territoire donné (ici le territoire du Ventoux) qui permettront d'engager la réflexion sur les stratégies d'adaptation à mettre en œuvre.

Ce travail a été ainsi réalisé dans le cadre d'un projet de recherche non subventionné piloté par l'INRA mais réalisé en étroite collaboration avec les responsables de l'ODG Ventoux. Ce travail a permis d'établir une première base de connaissances concernant les évolutions du climat passées et futures dans un petit territoire, mais riche de par sa diversité de situations pédo-topo-climatiques.

Ce document est une analyse statistique et factuelle des évolutions passées et des futurs plausibles de la région viticole du Ventoux.

Bonne lecture.

Résumé

Le vignoble du Ventoux est un territoire riche en histoire, géographie, biodiversité, mais aussi en ce qui concerne sa climatologie. Alors que le changement climatique a déjà affecté et modifié les conditions climatiques de la plupart de vignobles à travers le monde, le vignoble du Ventoux n'est pas une exception.

Dans cette région l'évolution de la phénologie ces dernières 40 années a suivi la même tendance que dans d'autres vignobles : une avancée, plus ou moins importante selon les secteurs, de la plupart des stades phénologiques qui a légèrement ralenti ces dernières années. Ces changements ont eu déjà comme conséquence un changement significatif des conditions climatiques de la plupart des secteurs pendant le cycle de croissance et la maturation de la vigne. Certains secteurs très froids (Murs, Suzette, Ville sur Auzon) ont vu leurs températures augmenter de manière significative. D'une manière générale nous avons observé une diminution de la variabilité climatique du territoire. Par ailleurs, la pluviométrie n'a pas montré de tendance significative dans le territoire et seulement le déficit hydrique (calculé comme la pluviométrie moins l'évapotranspiration potentielle) a légèrement augmenté dans certains secteurs vers la fin du cycle. Enfin, les autres variables climatiques qui ont été étudiées n'ont pas montré de tendance significative. Enfin, si l'on compare le vignoble du Ventoux aux autres vignobles du Côtes du Rhône vauclusien, il est celui qui montre les températures de nuits (températures minimales) les plus fraîches ainsi qu'une plus importante amplitude thermique. En parallèle, l'évolution de la température maximale de ces dernières années le rapproche des autres secteurs viticoles du département.

Face à ces changements, nous avons analysé l'évolution des tendances déjà observées en prenant en compte les différents scénarios climatiques que l'on pourra rencontrer à l'avenir. Comme attendu, l'évolution de la phénologie et des conditions climatiques futures sera très différente en fonction du scénario socio-économique retenu. Indépendamment du scénario retenu, l'avancement de la phénologie va se poursuivre ainsi que l'augmentation de la température pendant les phases de croissance jusqu'à l'année 2050. Nos connaissances actuelles pourront probablement nous permettre de nous adapter à ces changements si l'on commence à travailler dès maintenant. Cependant, au-delà de cette date et si l'on tient compte du scénario qui n'envisage pas de modification des émissions actuelles (RCP 8.5) les modifications du climat seront très importantes et notre capacité d'adaptation dans certains secteurs deviendra de plus en plus limitée.

Cette étude explore l'évolution des conditions climatiques du territoire du Ventoux (passées, actuelles et futures) et propose une analyse permettant de mettre en place des stratégies d'adaptation aux conditions futures en prenant en compte la diversité de situations climatiques existantes.

Liste d'acronymes, abréviations et formules chimiques

AOC : Appellation d'Origine Contrôlé

AR5 : Fifth Assessment Report – Cinquième Rapport d'Evaluation

AR6 : Sixth Assessment Report – Sixième Rapport d'Evaluation

BBCH : Biologische Bun-desanstalt für Land- und Forstwirtschaft

CH₄ : Méthane

CNRM : Centre Nationale de Recherches Météorologiques

CO₂ : Dioxyde de carbone

ETP : Evapotranspiration potentielle

GES : Gazes à Effet de Serre

GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

H₂O : Eau

IGN: Institut national de l'information géographique et forestière

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IPSL: Institut Pierre Simon Laplace

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

N₂O : oxyde nitreux

PNAS : Proceedings of the National Academy of Sciences

ppb : Parts par billion

ppm : Parts par million

RCP : Representative Concentration Pathway

WRF : Weather Research and Forecasting

Sommaire

Résumé.....	2
1 Introduction.....	6
1.1 La région viticole du Ventoux.....	6
1.2 Objectifs de l'étude.....	8
2 Le contexte scientifique.....	9
2.1 Le changement climatique passé et futur.....	9
2.1.1 L'effet de serre.....	9
2.1.2 Les évolutions futures.....	10
2.1.3 Evolution d'autres variables climatiques.....	12
2.2 La phénologie de la vigne.....	15
2.3 Les indicateurs écoclimatiques.....	16
3 Données et méthodes.....	18
3.1 Zone d'étude climatique.....	18
3.2 Données climatiques.....	19
3.3 Données phénologiques.....	20
3.4 Méthodologie général de l'étude.....	20
3.5 Analyses statistiques.....	21
4 Le climat passé dans le vignoble du Ventoux (1967 – 2017).....	23
4.1 L'évolution de la phénologie.....	23
4.1.1 Evaluation du modèle de phénologie.....	23
4.1.2 Evolution temporelle et spatiale de la phénologie et de la vendange.....	24
4.1.3 Evolution du vignoble du Ventoux par rapport au vignobles de Vaucluse. Tendances et variabilité.....	27
4.1.4 Durée des phases phénologiques.....	30
4.1.5 Détection d'une rupture temporelle de la phénologie :.....	32
4.2 Evaluation des conditions climatiques à l'aide d'indicateurs écoclimatiques.....	35
4.2.1 Analyses des principales phases phénologiques.....	35
4.2.2 Conditions climatiques autour des stades phénologiques.....	44
4.2.3 Analyse du déficit hydrique.....	48
5 Analyse climatique futur.....	51
5.1 Etude de la phénologie.....	51
5.1.1 Evolution de la phénologie en fonction des différents scénarios et modèles.....	51

5.1.2	Evolution de la durée des phases	54
5.2	Etudes des indicateurs écoclimatiques	55
5.2.1	Evolution des indicateurs de température	55
5.2.2	Evolution de la somme des précipitations	59
5.2.3	Evolution du déficit hydrique	60
5.3	Une extension du territoire du Ventoux : le cas de Monieux.....	62
6	Conclusions.....	64
7	Littérature.....	66
Annexe 1	.....	70
Annexe 2	.....	71
Annexe 3	.....	75
Annexe 4	.....	83
Annexe 5	.....	87
Annexe 6	.....	88
Annexe 7	.....	89
Annexe 8	.....	91

1 Introduction

1.1 La région viticole du Ventoux

- **Situation géographique et extension**

Inscrite à l'intérieur de l'ensemble des vignobles de la Vallée du Rhône, la zone géographique s'étend à l'est du Rhône, des faubourgs de Vaison-la-Romaine, au nord, à Apt, au sud, de la rivière Ouvèze à la vallée du Coulon. Elle passe ainsi des Dentelles de Montmirail aux versants du nord du Luberon, traversant les Monts du Vaucluse et s'enroulant au pied du Mont Ventoux (1910 m) (Figure 1).

La géomorphologie de la zone géographique, issue de l'orogénèse pyrénéenne, a généré de multiples coteaux sur substratum calcaire. L'épaisse formation de calcaire dur de l'Urgonien (Crétacé inférieur) fournit l'ossature de ces reliefs, dont la structure actuelle a été formée lors de la surrection alpine au cours du Miocène moyen. Il en résulte des sols rouges méditerranéens, des sols bruns calcaires peu évolués, arides, des sols d'érosion colluviaux, éluviaux et squelettiques. Tous sont relativement caillouteux, alimentés grâce aux éboulis calcaires issus des reliefs. Les sols à la texture sableuse, légère, riche en cailloutis issus des formations grésosablo-marneuse du Miocène sont, sans doute, les plus représentatifs. Marquée par le climat méditerranéen, la zone géographique constitue néanmoins la transition avec les secteurs alpins plus froids. Elle est par ailleurs l'une des plus ensoleillée du département (2800 heures par an à Carpentras). La pluviométrie moyenne annuelle est de 700 millimètres concentrés essentiellement en automne et, au minimum, en été. De plus, en fin d'été, l'amplitude thermique journalière est plus importante que dans le reste du département avec des nuits plus fraîches.

Le Mistral est le vent prédominant (Nord) mais la chaîne des Dentelles de Montmirail et les contreforts du Mont Ventoux permettent de limiter sa violence et sa froideur.

- **L'appellation Ventoux :**

Un atelier de potier et des poteries vinaires, datées de l'an 30 avant notre ère, sont les premières traces enregistrées de l'occupation viticole qui, comme dans toute cette partie du territoire, a été liée aux présences grecques puis romaines. La culture de la vigne sur les pentes du Mont Ventoux n'a cessé d'être pratiquée depuis l'Antiquité. Ce sommet, le plus élevé et le plus spectaculaire de tout le massif calcaire vauclusien (désigné parfois sous le nom de « Géant de Provence »), domine et influence ce vignoble, auquel il prête son nom depuis des temps très reculés. On en trouve la preuve écrite dès le IX^{ème} siècle. Bien évidemment, les vins du « Ventoux » ont bénéficié de la présence pontificale en Avignon et sont présents sur ses tables de 1309 à 1414. Les cadastres des communes du Comtat-Venaissin dressés entre 1414 et 1417 donnent les superficies plantées à cette époque. Du XVI^{ème} au XVIII^{ème} siècle, les consuls de Pernes publient des « bans de vendange », preuve que la production de vins de qualité est déjà une préoccupation des autorités locales.

La démarche vers une reconnaissance officielle de la qualité des vins débute le 29 juillet 1939 par la création du Syndicat des Viticulteurs des « Côtes du Ventoux et des Monts de Vaucluse ». Celle-ci aboutit, en 1951, par la reconnaissance en appellation d'origine vin délimité de qualité supérieure, puis en 1973, par la reconnaissance en appellation d'origine contrôlée « Côtes du Ventoux » par le décret du 27 juillet 1973. Pour répondre à un souhait de simplification et pour mettre en avant le nom géographique, le nom de l'appellation d'origine contrôlée devient « Ventoux » par décret du 17 octobre 2009.

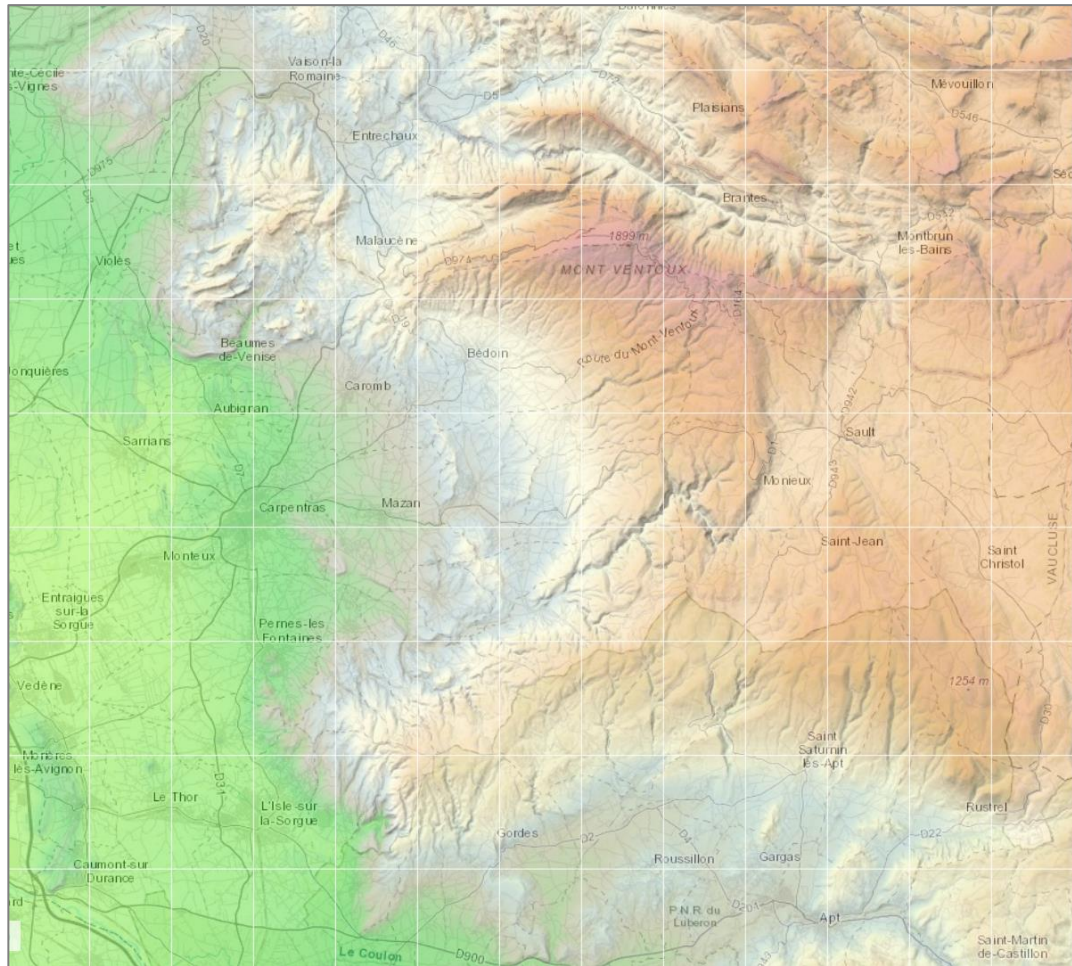


Figure 1. Territoire du Ventoux (Carte issue de Geoportail - IGN).

- ***La viticulture de l’AOC Ventoux***

Les vins de l’appellation d’origine contrôlée « Ventoux » sont des vins tranquilles¹ et secs. La superficie de production est de 6000 ha. Ils se déclinent en trois couleurs : rouges, rosés et blancs (60%, 36% et 4% de la production respectivement). Pour l’année 2018, la production a été assurée par 166 producteurs dont 14 coopératives, 8 vinificateurs et 144 caves particulières.

Les vins rouges présentent un titre alcoométrique volumique naturel minimum de 12%. Il est au minimum de 11,5 % pour les vins blancs et rosés. Les cépages utilisés sont ceux de la région rhodanienne : Grenache, Syrah, Mourvèdre, Carignan, Cinsault, Bourboulenc, Clairette, Counoise, Marsanne, Marselan, Piquepoul noir, Roussanne, Vermentino et Viognier.

¹ Vin tranquille correspond à un vin qui ne forme pas de bulles à l’ouverture, car il n’a pas fait de fermentation carbonique. C’est le contraire d’un vin effervescent.

1.2 Objectifs de l'étude

Dans ce contexte géographique et avec une grande diversité pédoclimatique il est important d'évaluer l'évolution future de ce territoire face au changement climatique. En effet, la grande diversité de situations ne permet pas de définir une seule voie pour s'adapter aux modifications futures. Il est nécessaire dans ce cas de bien identifier et quantifier, d'une part les évolutions passées et leurs impacts et, d'autre part l'évolution (les évolutions) possible(s) de ce territoire face aux différents scénarios climatiques futurs. C'est tout l'objet de ce travail de répondre à ces deux questions.

Pour cela, nous allons décrire d'une manière générale le contexte scientifique de l'étude, en introduisant quelques concepts autour du changement climatique, de la phénologie et des indicateurs climatiques qui seront les trois axes sur lesquels cette étude sera conduite.

Ensuite, nous allons:

- faire un état des lieux de l'évolution de la phénologie et du climat (à partir d'indicateurs écoclimatiques) sur le secteur Ventoux depuis la fin des années 1960 jusqu'à 2017. Nous ferons une analyse des tendances, des évolutions et de la variabilité observée dans cette région.
- Evaluer comment la phénologie et les conditions climatiques vont évoluer à l'avenir en prenant en compte les différents scénarios possibles (RCP₂) à l'horizon 2100. Nous allons quantifier les tendances et la variabilité à différentes périodes.

² RCP : Representative Concentration Pathway. Ces scénarios sont ceux utilisés par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour définir la trajectoire de forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300 dans le rapport de 2013. Voir section 2.1.2 pour plus d'information.

2 Le contexte scientifique

L'augmentation significative des températures mesurées a généré un impact déjà visible sur le fonctionnement des plantes. Par ailleurs, l'évolution future attendue des températures d'ici la fin du siècle, risque de dépasser la gamme de températures actuellement connue (IPCC, 2013) si des politiques de diminution drastique d'émission de gaz à effet de serre ne sont pas mises en œuvre dans les 5 prochaines années. Ces évolutions vont affecter tous les agroécosystèmes rendant nécessaire, dès maintenant, l'élaboration de stratégies d'adaptation à ce changement. Dans ce contexte, les agroécosystèmes concernant les espèces pérennes (dont la vigne) sont particulièrement vulnérables, car leur gestion et adaptation doivent être anticipées longtemps à l'avance. Dans cette section nous rappelons quelques concepts et évolutions déjà observées.

2.1 Le changement climatique passé et futur

2.1.1 L'effet de serre

L'effet dit « de serre » est un phénomène naturel qui permet de maintenir une température d'environ +15°C (au lieu de -18°C en son absence). Ainsi, pour arriver à cette température, la surface terrestre réfléchit environ 30% du rayonnement reçu du soleil et absorbe les 70% restants. L'énergie absorbée est ensuite renvoyée vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge dont une partie est absorbée dans l'atmosphère par certains gazes (les gaz à effet de serre - GES), lesquels émettent à leur tour des infrarouges vers l'espace et vers la Terre. Ces gazes empêchent donc qu'une partie de l'énergie ne se dissipe dans l'espace. Les principaux GES présents dans l'atmosphère terrestre sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). Avant le début de l'ère industrielle (avant 1850), les concentrations de ces gaz étaient régulées par des processus naturels. Depuis l'ère industrielle (après 1850), les concentrations des GES dans l'atmosphère n'ont pas cessé d'augmenter en raison des activités humaines (utilisation croissante d'énergies fossiles pour les usages industriels, domestiques et pour le transport, intensification de l'agriculture, déforestation, etc.). Alors que la concentration en vapeur d'eau a été peu modifiée, les concentrations en CO₂, en CH₄ et en N₂O ont augmenté considérablement (Tableau 1) étant largement responsables d'un effet de serre additionnel d'origine anthropique responsable du changement climatique observé (IPCC, 2013).

Tableau 1. Concentration des principaux gaz à effet de serre dans l'atmosphère : H₂O, CO₂, N₂O et CH₄. NB : ppm : parties par million (1 ppm = 0,0001%); ppb : parties par milliard. Données de l'Agence Européenne de l'Environnement et du Earth System Research Laboratory (NOAA). *L'augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère est due au fait qu'une atmosphère plus chaude peut contenir plus d'humidité. **Données de 2015.

	Niveau préindustriel (Avant 1850)	Concentration Actuelle (2018)
H ₂ O	0.30%	Légère augmentation*
CO ₂	284.7 ppm	411.75 ppm
N ₂ O	275.4 ppb	327.7 ppb**
CH ₄	801.4 ppb	1867.2 ppb

L'évolution passée du climat en France

En France, l'évolution de la température suit les mêmes tendances qu'au niveau mondial mais avec un réchauffement qui a été environ 30% plus élevé que le réchauffement moyen planétaire. D'une manière générale le nombre de jours chauds a augmenté et le nombre de jours froids a diminué significativement (Moisselin et Dubuisson, 2006). Malgré une diminution significative du nombre de jours et de la fréquence des vagues de gel (Planton et al., 2015), certains événements ponctuels (épisodes de gel en 2012, 2016 et 2017) continuent d'avoir un fort impact sur la production agricole. D'une manière générale, les températures moyennes ont pour leur part augmenté de 0,31°C par décennie (Gibelin et al., 2014).

Concernant les précipitations, leurs cumuls annuels n'ont pas évolué de façon significative depuis les années 1960 à l'échelle de la France continentale. Néanmoins, malgré ces tendances globales il existe une forte variabilité interannuelle et d'importantes différences régionales avec une augmentation dans le Nord et une diminution dans les régions du sud, notamment dans les départements de la Côte d'Azur et de la Corse. Cette différence observée est particulièrement marquée en période hivernale. Le pourtour méditerranéen observe une diminution des précipitations à toutes les saisons, alors que les pluies printanières et automnales ont plutôt augmenté sur l'ensemble du territoire (surtout dans l'Est). Enfin, le nombre de jours de fortes précipitations (plus de 10 mm) et leur probabilité d'occurrence a augmenté en lien avec le changement climatique (Luu et al., 2018).

D'autres variables comme le vent, l'humidité ou le rayonnement n'ont pas assez de profondeur historique d'observation ou ne montrent pas des tendances significatives.

2.1.2 Les évolutions futures

- **La modélisation du climat et les scénarios climatiques futurs**

Afin de prédire l'évolution du climat futur et ses conséquences, le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat³) utilise des modèles qui décrivent le fonctionnement global du climat à l'échelle de la planète, dénommés Modèles de Circulation Générale (MCG). Ces modèles (environ 50 venant de différents groupes de recherche internationaux) sont inter-comparés pour décrire le climat du passé récent (depuis 1950 qui sert comme période pour valider les modèles) et celui du futur jusqu'à l'horizon 2300. Ces modèles prennent en compte la végétation, les cycles hydriques, la couverture du sol, la topographie, mais aussi l'activité volcanique ou solaire, l'activité humaine (via les émissions de GES...), afin de bien représenter le climat global.

Quatre scénarios d'évolution des concentrations des GES ont été proposés (en anglais RCP : Representative Concentration Pathways) pour simuler l'évolution du climat futur (Figure 2, Tableau 2). On peut observer dans la Figure 2 que si les évolutions des émissions de CO₂ des différents scénarios sont assez différentes dès 2030, en revanche les différences d'évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ ne seront visibles qu'après 2050. Cela est notamment dû au fait que les molécules de CO₂ restent en

³ LE GIEC a produit à ce jour a produit cinq rapports scientifiques sur les questions suivantes: évolution du climat, mesures d'adaptation et d'atténuation et une synthèse pour les décideurs. Le dernier rapport, le AR5, a été publié en 2014 (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>) et le prochain (AR6) sera publié en 2022. Pour plus d'information voir Jouzel et al., (2018)

moyenne 100 ans dans l'atmosphère expliquant un fort effet d'inertie dans l'évolution des concentrations. La diminution des émissions ne sera donc pas immédiatement suivie par un effet sur les concentrations.

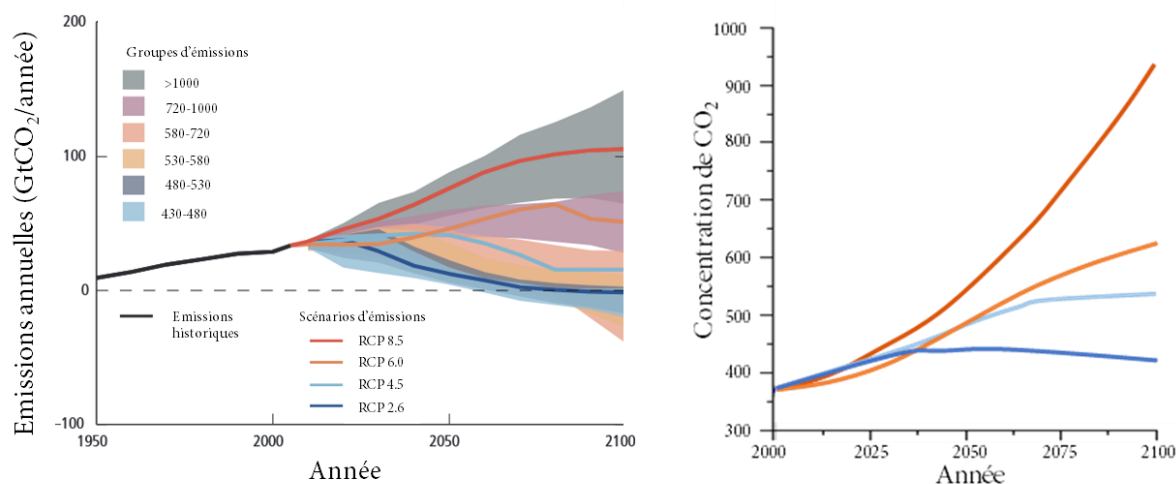


Figure 2. (A) Evolution des émissions des GES (ici le CO₂) en fonction des différents scénarios proposés par le GIEC. (B) Evolution des concentrations de CO₂, le principal GES, en ppm. D'après IPCC, 2013.

Tableau 2. Hypothèses et concentrations en CO₂ à l'horizon 2100 des quatre scénarios d'émissions retenus par le GIEC pour évaluer l'évolution du climat futur.

Scénario de forçage	Concentration de CO ₂ en 2100	Hypothèses
RCP 2.6	490	Diminution forte des émissions de GES dès 2020
RCP 4.5	650	Diminution des émissions de GES avant 2050
RCP 6.0	850	Diminution des émissions de GES après 2050
RCP 8.5	1370	Aucune mesure d'atténuation n'est envisagée et les émissions continuent d'augmenter de manière exponentielle jusqu'à bien après 2100

Les MCG produisent des simulations à l'échelle du globe à une résolution spatiale assez faible (entre 50 et 200 km) ce qui ne permet pas de les utiliser directement pour évaluer des impacts (par exemple en agriculture). Pour cela, on réalise un travail de 'descente d'échelle', ce qui nous permet d'atteindre des résolutions plus élevées (environ 8 à 12 km ; Ouzeau et al., 2014). Actuellement en France nous avons deux modèles climatiques (IPSL-WRF et CNRM-Aladin-Climat). Ces modèles permettent de mettre à disposition via la plateforme DRIAS⁴ des simulations sur le territoire métropolitain à une résolution de 8 km. Ces données simulées seront utilisées par la suite pour réaliser l'analyse des conditions climatiques futures de la région Ventoux.

- **Evolution attendue de la température**

Nous attendons une augmentation significative de la température moyenne en France. Cette augmentation sera plus ou moins importante en fonction de la saison, le scénario (RCP) et le modèle climatique utilisé. Ainsi, et par rapport à la période 1976-2005, on peut s'attendre à une augmentation

⁴www.drias-climat.fr

d'environ +1.5°C (RCP2.6), +2°C (RCP4.5) et environ +4°C (RCP8.5) en hivers⁵, et de 1.5°C (RCP2.6), supérieure à 2°C (RCP4.5) et d'environ +6°C (RCP8.5) en été⁶ pour les trois scénarios étudiés (Ouzeau et al. 2014). Ces évolutions des températures s'accompagneront d'une augmentation de la durée des vagues de chaleur, surtout dans les régions du Sud-Est (accentuée à la fin du siècle pour le scénario RCP 8.5). Les températures pourraient occasionnellement dépasser 50°C sur l'ensemble de la France métropolitaine (Bador et al., 2017). Enfin, une diminution du nombre de jours très froids est également prévue, sans pour autant pouvoir complètement écarter les risques de gel, notamment en raison des interactions entre ces jours froids et l'avancement de la date de débourrement (Sgubin et al., 2018).

- **Evolution attendue de la pluviométrie**

Les simulations des deux modèles français prévoient une augmentation des précipitations hivernales (s'amplifiant jusqu'à la fin du siècle) et une tendance vers une diminution pendant l'été. Néanmoins, ces prévisions sont moins robustes que celles des températures (d'importantes divergences à l'horizon lointain). La fréquence des précipitations extrêmes pourrait augmenter significativement à l'horizon 2071-2100, en particulier selon le scénario RCP8.5. En parallèle, malgré la difficulté d'avoir des tendances claires à court terme (2050), les simulations vers la fin du siècle montrent une augmentation significative de périodes sèches sur tout le pourtour du bassin méditerranéen.

- **Evolution d'autres variables climatiques**

Les autres variables climatiques d'intérêt comme le rayonnement, l'humidité relative de l'air et le vent, ont été beaucoup moins étudiées. Par ailleurs, de fortes incertitudes demeurent concernant l'évolution de la fréquence des événements froids extrêmes, des tempêtes ou des orages de grêle.

2.1.3 Evolution du climat dans le département du Vaucluse

La Figure 3 montre l'évolution des températures moyennes quotidiennes hivernales et estivales dans le département du Vaucluse selon les trois scénarios d'évolution de GES (RCP 2.6, 4.5 et 8.5) à différents horizons temporels. La Figure 4 montre l'évolution des pluviométries cumulées hivernales et estivales du département de Vaucluse selon les mêmes scénarios et horizons temporels. Dans les deux cas, nous avons représenté les résultats du modèle Aladin-Météo France.

Nous pouvons remarquer que les tendances de la température sont les mêmes (plus ou moins importantes) que celles décrites plus haut concernant la métropole. On peut souligner que notamment les zones de montagne seront les plus affectées par l'augmentation de la température estivale à l'horizon 2100 et pour le scénario RCP8.5 (augmentation de plus de 5°C). Concernant la pluviométrie, les tendances sont beaucoup plus variables avec une légère augmentation des cumuls en hiver et une légère diminution en été.

⁵ Hiver : Décembre, Janvier et Février.

⁶ Été : Juin, Juillet et Aout.

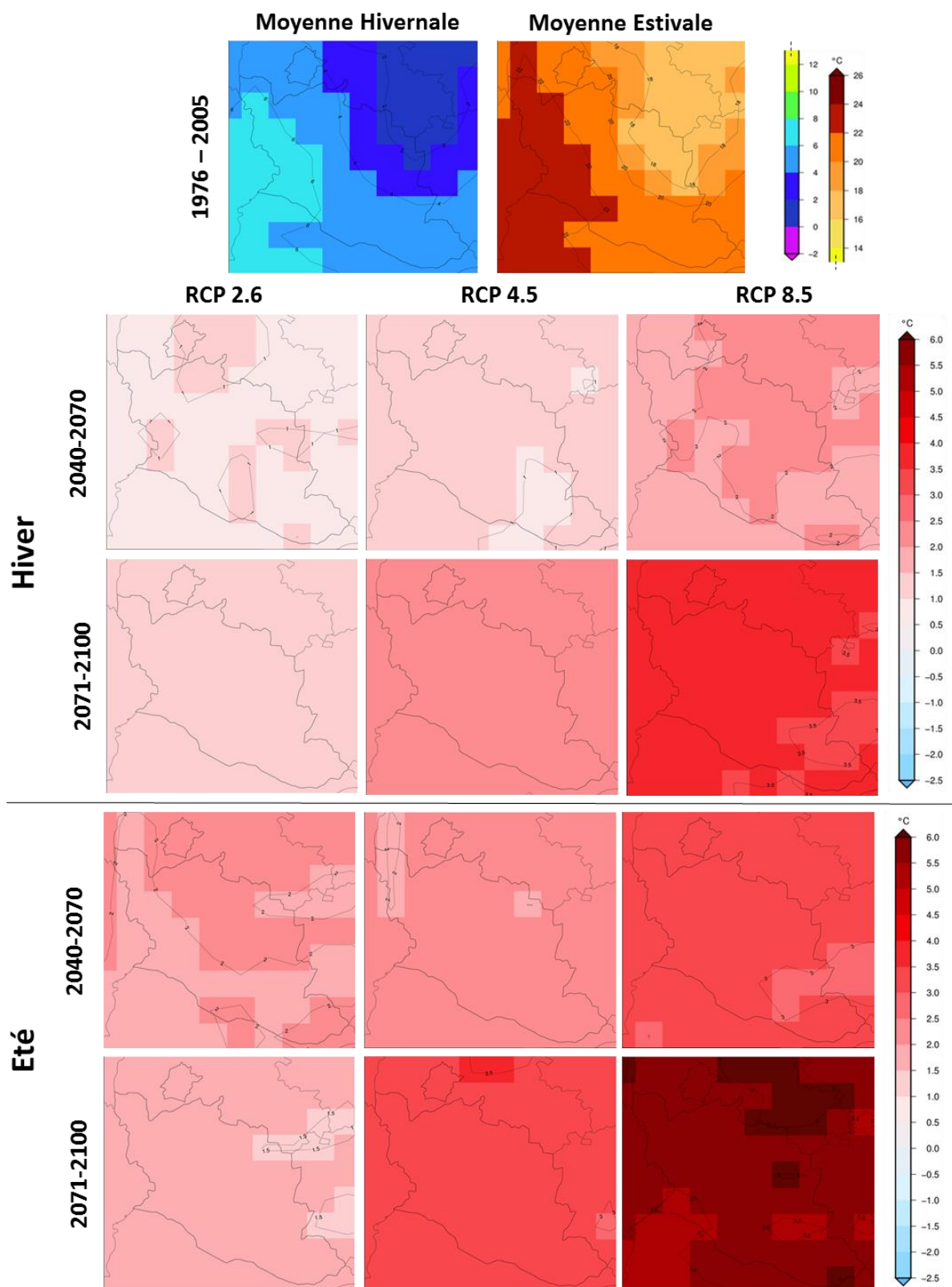


Figure 3. Valeurs moyennes quotidiennes des températures hivernales et estivales pour la période de référence (1976 -2005) en Vaucluse. Anomalie des températures moyennes quotidiennes dans le département de Vaucluse : écart entre la période de référence et la période considérée (2040-2070 et 2071-2100) pour les différents scénarios (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Les figures représentent les moyennes hivernales et estivales de ces anomalies. Expérience : Météo France/CNRM2014 : Modèle Aladin de Météo France. <http://www.drias-climat.fr/>

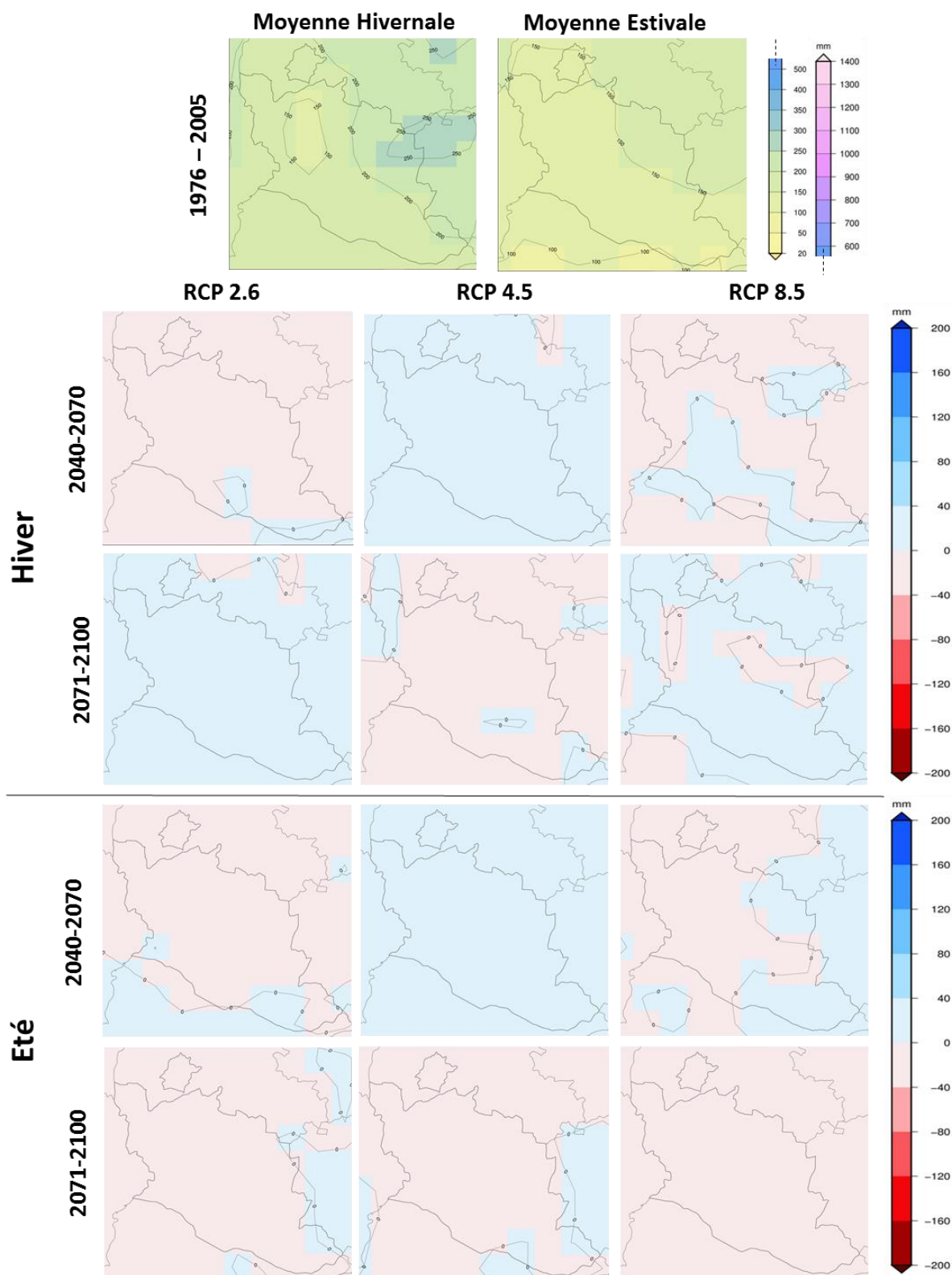


Figure 4. Valeurs des cumuls de précipitations quotidiens hivernaux et estivaux pour la période de référence (1976 -2005) en Vaucluse. Anomalie des cumuls de précipitations dans le département de Vaucluse : écart entre la période de référence et la période considérée (2040-2070 et 2071-2100) pour les différents scénarios (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Les figures représentent les moyennes hivernales et estivales de ces anomalies. Expérience : Météo France/CNRM2014 : Modèle Aladin de Météo France. <http://www.drias-climat.fr/>

2.2 La phénologie de la vigne

La phénologie est l'étude des rythmes saisonniers des organismes vivants qui sont déterminés par les variations saisonnières du climat. Parmi les différents traits décrivant le fonctionnement des espèces, la phénologie a été identifiée comme le premier indicateur biologique du changement climatique (Menzel et al., 2006). Les événements phénologiques étant pilotés par les conditions météorologiques (principalement la température), le changement climatique est en train de bouleverser les rythmes saisonniers de l'ensemble du monde vivant. La phénologie est une caractéristique principale permettant d'évaluer la capacité des espèces à s'adapter aux changements. L'observation de l'évolution des stades phénologiques (débourrement, floraison, maturation ...) sur différentes espèces a permis de mesurer l'ampleur du changement climatique et d'évaluer ses conséquences à moyen terme sur le développement des plantes, leur croissance et / ou la qualité des fruits.

Concernant la vigne, les principaux stades phénologiques observés sont (Figure 5 et Figure 6) :

- Le débourrement (stade BBCH 7) - Observation de 50% de pointes vertes (ou rouges) du bourgeon.
- La floraison (stade BBCH 65) - Observation de 50% des fleurs ouvertes.
- La véraison (stade BBCH 85) - Observation de 50% de baies en véraison.

A ces stades s'ajoutent deux autres stades (ou événements) importants :

- La dormance (stade BBCH 00) qui est un stade qui ne peut pas être observée directement sur le terrain (observation sur des boutures en chambre de forçage) mais qui est un stade clé pour le bon développement de la plante et notamment pour son débourrement ultérieur.
- La vendange (stade BBCH 89) qui ne peut pas être considérée comme un stade phénologique en tant que tel, car elle est décidée par des critères techniques qui peuvent varier selon la région, le cépage et le type de vin recherché.



Figure 5. A.- Dormance - BBCH 00 ; B.- Débourrement - BBCH 07 ; C.- Floraison BBCH 65 ; D.- Véraison BBCH 85. ^{7 8}

⁷ Crédits photos : Iñaki Garcia de Cortazar Atauri (Licence CC-by-SA)

⁸ Protocole d'observation à télécharger ici : <https://www6.inra.fr/soere-tempo/content/download/4003/38696/version/2/file/fiche+Vigne+PerphClim+VF.pdf>

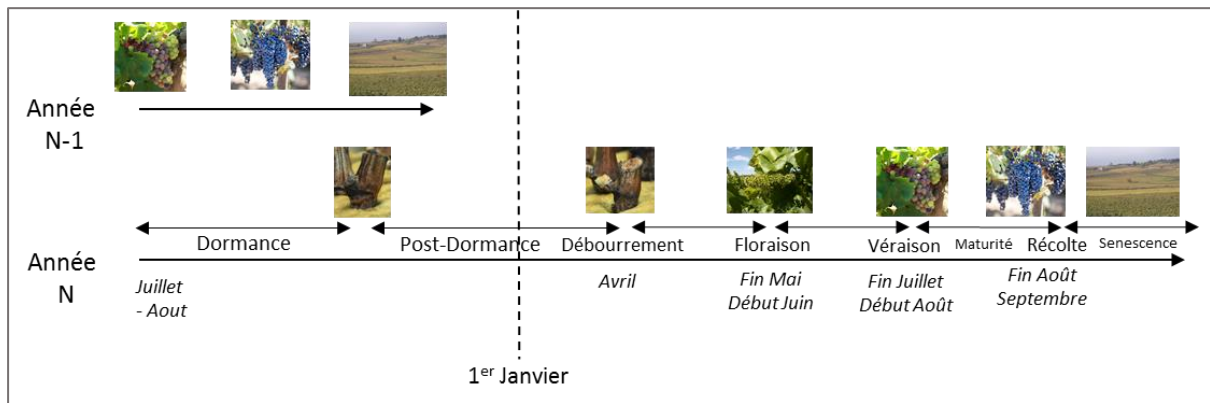


Figure 6. Cycle de développement de la vigne de l'année N. L'entrée en dormance des bourgeons de l'année N se réalise au moment de l'arrêt de croissance végétative de l'année N-1 (autour de la véraison). A ce moment les bourgeons entrent en dormance jusqu'à la levée de dormance (fin de l'année N-1). Ces bourgeons fructifères vont débourrer en début du printemps pour faire le cycle complet jusqu'à la récolte des grappes fin Août- début septembre (dans la région des Côtes du Rhône) et ensuite entrer dans la phase de sénescence foliaire.

Depuis plusieurs années, plusieurs modèles ont été développés et testés pour prédire les différentes phases de développement de la vigne. Ces travaux ont permis de proposer une gamme de modèles assez complets permettant de simuler les phases de débourrement, floraison et véraison pour plusieurs cépages. Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2017 ont décrit l'état de ces travaux en France et à l'étranger. Dans ce travail nous allons utiliser un modèle permettant de simuler les différentes phases phénologiques de la vigne dans la région du Ventoux.

Enfin, dans le cadre d'études d'impact du changement climatique sur les productions agricoles, la prise en compte de la phénologie permet de mieux représenter le réel effet du climat sur le fonctionnement de la plante. Du fait de l'évolution des températures de ces dernières décennies, les stades phénologiques ont avancé de manière significative et donc les phases de développement ont aussi changé. Les indicateurs agroclimatiques classiques adaptés à la vigne (Winkler, Huglin, Tonietto, nuits fraîches), lesquels sont calculés pendant des périodes fixes (e.g. du 1^{er} avril au 30 septembre), ne nous permettent pas de prendre en compte ces changements et ils vont donc sous-estimer ou surestimer les conditions climatiques réellement vécues par la vigne. C'est pour cette raison que dans cette étude nous utiliserons des indicateurs écoclimatiques.

2.3 Les indicateurs écoclimatiques

Les indicateurs agroclimatiques fournissent des informations synthétiques sur les effets du climat sur le fonctionnement des cultures. Ces indicateurs (degrés de chaleur, jours de gel et quantité de précipitations sur des périodes spécifiques) sont largement utilisés dans la littérature pour évaluer les effets du climat dans une zone donnée sur la productivité, la gestion des cultures et l'environnement et pour étudier la répartition des espèces (Caubel et al., 2015). Comme nous l'avons mentionné plus haut, les indicateurs agroclimatiques se calculent sur des périodes définies par des dates calendaires immuables (e.g. 1^{er} janvier et 31 janvier) (voir Figure 7).

Les indicateurs écoclimatiques vont définir la période de calcul en se basant sur les stades phénologiques (observés ou simulés à partir d'un modèle) de l'espèce d'intérêt. Le positionnement calendaire des phases,

mais aussi leur durée peut donc varier d'une année à l'autre. Cette méthode permet d'obtenir des informations plus précises sur les effets du climat sur sa croissance et son développement. Les indicateurs écoclimatiques ont été utilisés dans plusieurs travaux qui ont montré leur intérêt pour explorer des questions autour de la faisabilité d'une culture dans un lieu donné et pour caractériser l'évolution des risques climatiques associés à cette faisabilité (Holzkämper et al., 2013, 2011, Caubel et al., 2015 et 2017).

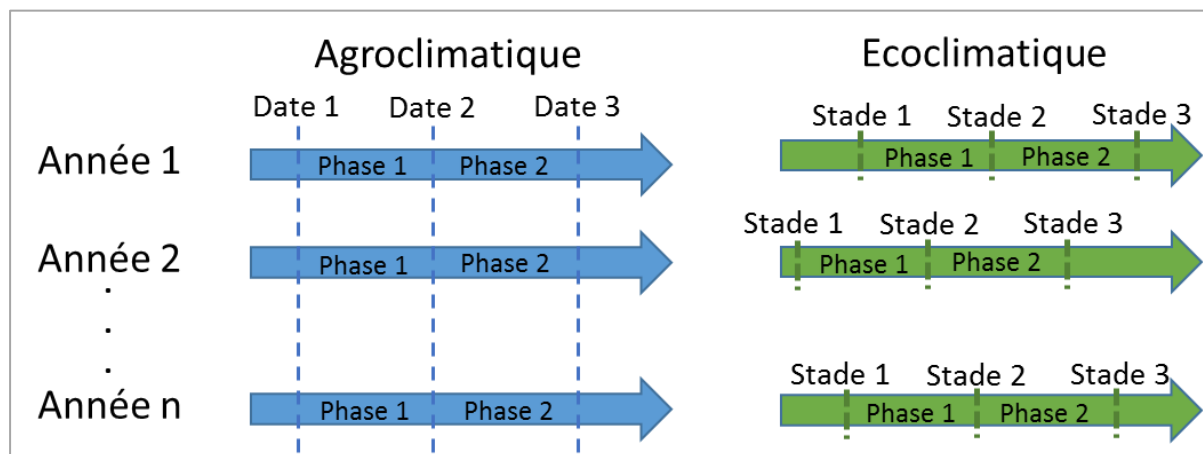


Figure 7. Schéma conceptuel d'un indicateur agroclimatique (à gauche) et d'un indicateur écoclimatique (à droite) (d'après P. Bertuzzi). Les indicateurs agroclimatiques décrivent une phase en utilisant deux dates calendaires (e.g. 1^{er} janvier et 31 janvier).

3 Données et méthodes

3.1 Zone d'étude climatique

La zone d'étude est représentée par un ensemble de mailles de 8km par 8km qui permettront de faire le lien avec l'information climatique disponible (voir plus bas). La zone d'étude est représentée par 25 mailles qui ont été choisies en fonction de la surface cultivée en vigne (critère de sélection : surface en viticulture supérieure à 1% de la surface de la maille) et avec une altitude inférieure à 750 m. Ces informations ont été extraites de la base de données Corine Land Cover 2012⁹ (base de données européenne recensant l'occupation biophysique des sols - Agence européenne de l'environnement).

Cette zone d'étude a été divisée ensuite en deux grands secteurs : le secteur Ventoux et le secteur de Côtes du Rhône Vauclusien (Figure 8). Le secteur Ventoux concerne l'ensemble de mailles dans lesquelles on produit actuellement du raisin de cuve qui rentre dans l'appellation Ventoux. Ces mailles seront analysées par la suite individuellement (en tenant compte de l'évolution temporelle de chaque maille) ou regroupées (en prenant en compte les valeurs médianes et la variabilité). En ce qui concerne le secteur Côtes du Rhône Vauclusien, celui-ci sera analysé en prenant en compte seulement l'ensemble des mailles (valeurs médianes et variabilités associées). Dans certains cas le point le plus précoce en terme de phénologie du secteur Côtes du Rhône Vauclusien sera représenté séparément pour montrer les écarts entre les secteurs.

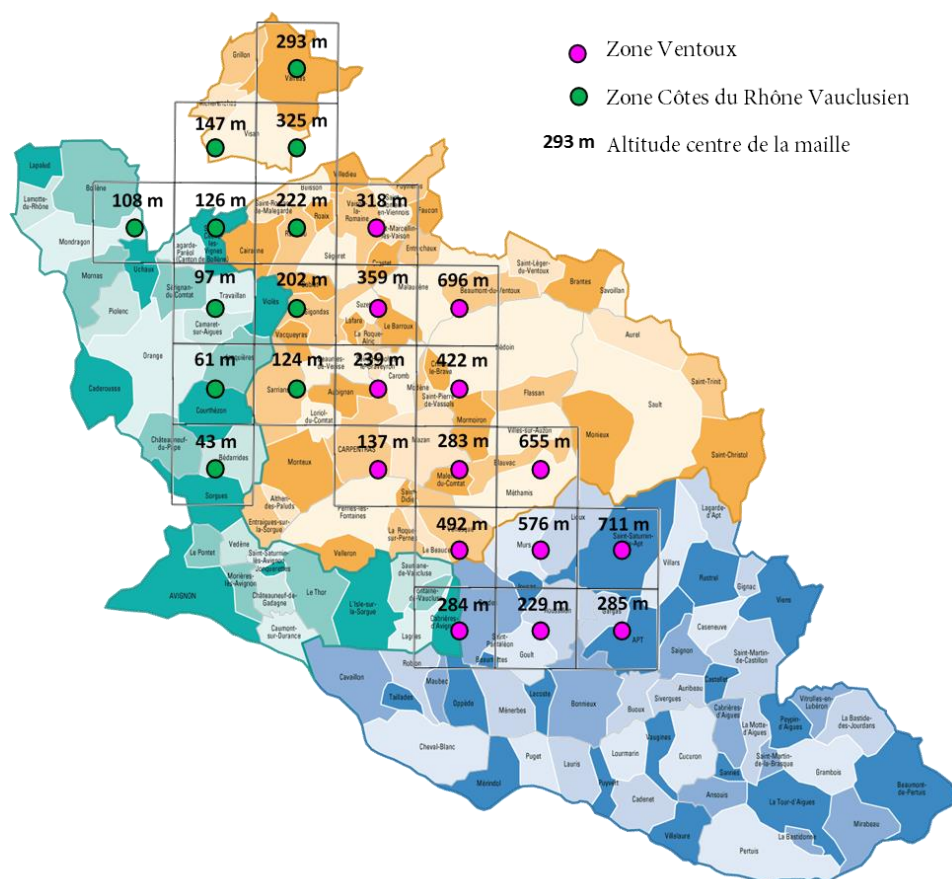


Figure 8. La zone d'étude et les deux secteurs analysés (rose secteur Ventoux, vert secteur Côtes du Rhône Vauclusien) sont représentés par des mailles de 64km². A l'intérieur de chaque maille est indiquée la valeur de son altitude moyenne.

⁹ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>

3.2 Données climatiques

Pour réaliser cette étude nous nous sommes appuyés sur des données issues de différentes sources.

- **Données climatiques observées - Période 1967-2017**

Pour faire l'analyse des conditions climatiques passées de la zone du Ventoux, nous n'avons pas utilisé directement de données climatiques mais nous nous sommes appuyés sur les données de phénologie et des indicateurs calculés dans le cadre du travail de Dura (2018) à l'échelle de tout le vignoble de la vallée du Rhône. Dans l'étude de Dura (2018) les indicateurs ont été calculés sur 92 mailles à l'échelle 8 km par 8 km (64km²) à partir de données SAFRAN¹⁰ (base de données de Météo France) pour la période 1956 – 2017. Les variables climatiques sont interpolées de la façon suivante: chaque maille se caractérise par la position de son centre et par son altitude (de ce point). La transformation du zonage SAFRAN en maillage régulier se fait par affectation de chaque maille à la zone qui contient son centre (Lhotellier, 2005). Ainsi SAFRAN permet d'interpoler sur cette région discrétisée (de 8km par 8 km) les paramètres météorologiques nécessaires aux autres modules climatiques. Pour étudier le climat du Ventoux, nous avons sélectionné les données issues de 16 mailles (Figure 8) pour la période 1967-2017, sauf pour l'évaluation des résultats issus du modèle de phénologie pour lequel nous avons utilisé la phénologie simulée dans les 92 mailles. Comme indiqué dans la figure, les valeurs de l'altitude correspondent à la valeur du point central de la maille lequel peut être parfois éloigné des zones actuelles de production de la vigne (points de Malaucène, Villes sur Auzon et Saint Saturnin lès Apt).

- **Données climatiques simulées - Période 1950-2100**

Pour analyser la période future, nous avons utilisé les données disponibles dans la plateforme DRIAS concernant l'exercice AR5 (Simulations Jouzel-2014¹¹) pour les deux modèles climatiques français (CNRM-Aladin et IPSL-WRF). Afin de prendre en compte les différentes hypothèses d'évolution des conditions climatiques, nous avons utilisé les données des scénarios RCP2.6 (seulement disponible pour le modèle CNRM), RCP4.5 et RCP8.5 (voir Figure 2 et Tableau 2). Toutes les simulations commencent en 1950, ont une période de référence commune (1950-2005) et divergent en fonction du scénario à partir de 2006 et jusqu'à 2100. Les données des variables climatiques sont à la même échelle (64km²) que les données de la maille SAFRAN. Cela nous permet de comparer les résultats obtenus pour les deux périodes. Pour chaque maille, nous avons utilisé les variables climatiques suivantes :

- Températures minimale, maximale et moyenne (°C)
- Précipitations (mm)
- Humidité (%) (*non disponible pour IPSL-WRF*)
- Rayonnement (W/m²) (*non disponible pour IPSL-WRF*)
- Vitesse du vent (m/s)

¹⁰ Pour plus d'informations sur la base de données SAFRAN, voir <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/165>

¹¹ <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/180>

3.3 *Données phénologiques*

Deux types d'informations phénologiques ont été utilisés dans ce travail : des données observées et des données simulées.

Les données observées sont issues des observations compilées par le Groupe de Développement Agricole de la Chambre d'Agriculture du Vaucluse. Ces données représentent deux secteurs (un précoce et un tardif) du vignoble de Côtes du Rhône (Figure 10). Ces données ont servi notamment à évaluer les dynamiques des différents stades phénologiques simulés par le modèle phénologique sur l'ensemble des mailles.

Par ailleurs, nous avons utilisé des données de phénologie simulées dans chaque maille pour la période passée (données issues de Dura 2018) et future. Les principaux stades phénologiques (débourrement, floraison et véraison) et la date de vendange sont calculés à partir d'un modèle phénologique séquentiel classique (Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2017). Ce modèle utilise comme données d'entrée des données de température journalières. Le modèle est initialisé pendant l'été au moment où les bourgeons fructifères de l'année suivante rentrent en dormance. Ensuite, par le cumul des températures fraîches (schilling) dans un premier temps, et de températures au-dessus d'un seuil (forcing) dans un second temps, le modèle calcule les dates des différents stades phénologiques de la vigne (Figure 6) : la dormance initialement et ensuite le débourrement, la floraison et la véraison. Pour calculer la date de vendange nous avons fait le choix d'ajouter un nombre fixe de jours (35 jours) à la date de véraison calculée par le modèle. En effet, la date de vendange est très dépendante du type de vin que nous voulons obtenir et elle ne dépend pas seulement de la température (Garcia de Cortazar-Atauri, 2010). Enfin, dans cette étude et afin de ne pas multiplier le nombre de répétitions nous avons choisi de travailler avec le cépage Syrah que l'on peut considérer comme un cépage avec une précocité moyenne (Parker et al., 2011 et 2013). Les paramètres pour calculer les différentes phases de développement sont issues de Morales-Castilla et al., (soumis à PNAS).

3.4 *Méthodologie générale de l'étude*

Afin d'analyser le potentiel impact des variables météorologiques sur la vigne dans le secteur Ventoux, des indicateurs écoclimatiques ont été calculés sur les différentes phases phénologiques de la vigne. Les phases phénologiques retenues sont celles qui se situent entre deux stades importants (Dormance-Débourrement, Débourrement-Floraison, Floraison-Véraison, Véraison-Vendange) et les périodes qui englobent les stades importants (Débourrement, Floraison, Véraison, Vendange) à plus ou moins 10 jours par rapport à la date d'apparition du stade (Figure 9).

Les indicateurs utilisent les principales variables climatiques (température, pluie, etc...) lesquelles peuvent être déclinées de plusieurs manières selon les périodes étudiées : nombre de jours de pluie, cumul de pluie, nombre de jours de températures supérieures à un certain seuil, température moyenne, etc... L'Annexe 1 montre la liste de tous les indicateurs (classés par variables climatiques utilisées) qui ont été calculés pour cette étude.

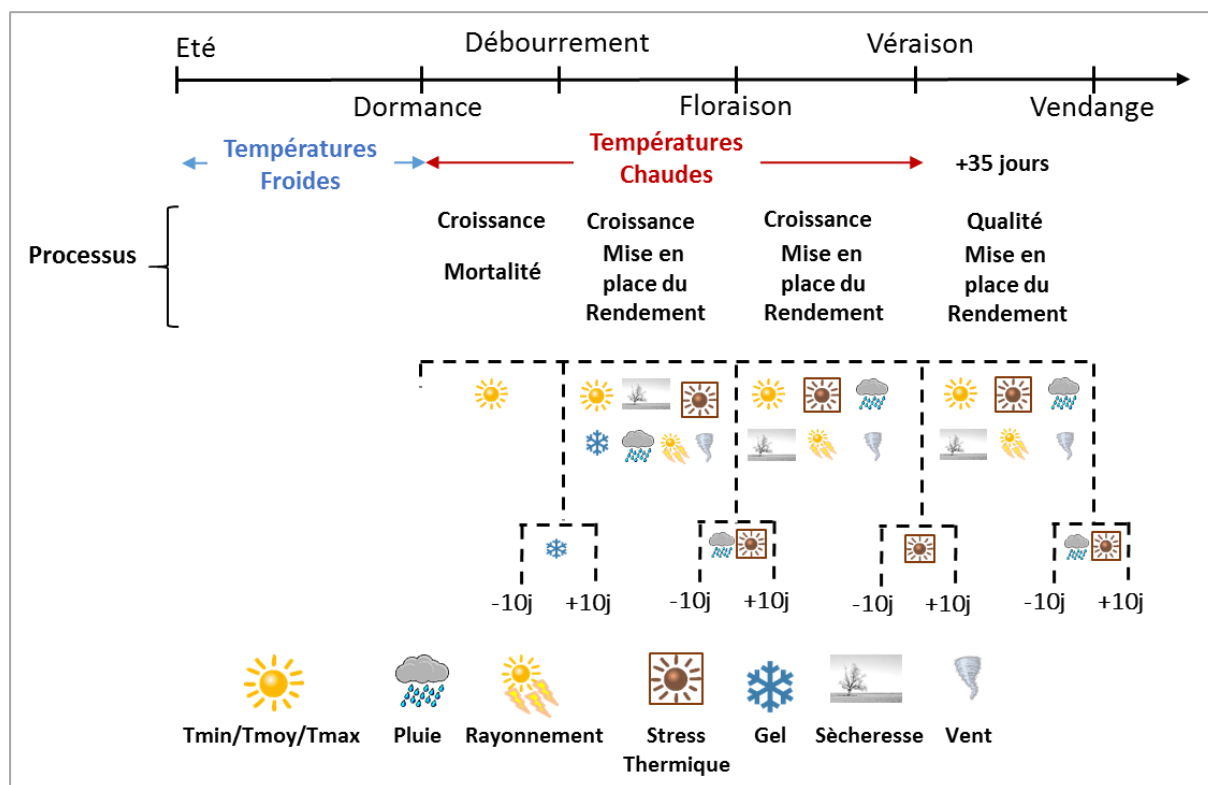


Figure 9. Schéma général de la méthode utilisée dans cette étude. Tmin= Moyenne des températures minimales journalières de la période ; Tmax= Moyenne des températures maximales journalières de la période ; Tmoy= Moyenne des températures moyennes journalières de la période.

3.5 Analyses statistiques

Plusieurs types d'analyses statistiques ont été utilisés dans ce travail.

- Analyse des tendances

Nous avons analysé les tendances temporelles des différents stades phénologiques et des valeurs de certains indicateurs. Dans ces cas, nous avons représenté les évolutions des valeurs de la médiane¹² calculée à partir de tous les valeurs de maille du secteur d'intérêt, ainsi que les quantiles¹³ (5%, 10%, 80% et 95%) lesquels permettent de représenter la variabilité existante. Les valeurs proposées dans les tableaux (e.g. évolution du nombre de jours) correspondent à la différence entre la valeur de la dernière année (e.g. 2017) et la première année (e.g. 1967).

- Analyse des ruptures temporelles

Dans ce travail, nous avons cherché à détecter des ruptures temporelles des différents stades simulés de la vigne. Une rupture temporelle peut se définir comme étant un changement de tendance dans l'évolution des données. Le test de Chow est utilisé dans le cadre des séries temporelles afin de déterminer une cassure significative dans les données. Il s'appuie sur une comparaison de modèle et permet de déterminer sous l'hypothèse nulle que les coefficients de deux régressions linéaires sont égaux. Ce test s'appuie sur la loi de

¹² Médiane : valeur qui permet de séparer l'échantillon en deux en représentant 50% des individus de chaque côté.

¹³ Quantile : valeurs qui divisent un jeu de données en intervalles contenant le même nombre de données.

Fisher et fait donc référence aux hypothèses sous-jacente d'homoscédasticité¹⁴ et de normalité des résidus, même si dans certains cas il peut s'appliquer en présence d'hétéroscédasticité ¹⁵(Toyoda, 1974).

¹⁴ L'homoscédasticité : la variance des erreurs stochastiques de la régression est la même pour chaque observation.

¹⁵ L'hétéroscédasticité : la variance des erreurs stochastiques de la régression est différente pour chaque observation.

4 Le climat passé dans le vignoble du Ventoux (1967 – 2017)

Dans cette section, nous allons décrire l'évolution passée et future de la phénologie de la vigne ainsi que des conditions climatiques subies par la plante (à travers des indicateurs écoclimatiques) pendant ses différentes phases de développement.

4.1 *L'évolution de la phénologie*

Dans cette section nous allons analyser l'évolution historique de la phénologie dans la zone du Ventoux en se focalisant sur chacun des stades (débourrement, floraison et véraison). Pour cela, nous avons attribué à chaque secteur le nom du village le plus représenté, délimité par des frontières fictives (voir Figure 8). Etant donné le manque de données observées de phénologie des différents stades dans le secteur étudié, nous avons récupéré les données simulées sur la période 1966 – 2018 par Dura (2018).

Pour chaque secteur du Ventoux nous avons ainsi regardé l'évolution dans le temps des différents stades, en quantifiant les évolutions significatives. Nous avons aussi évalué la variabilité interne du vignoble et son évolution par rapport au vignoble de la vallée du Rhône vauclusien. Enfin, pour chaque secteur, nous avons essayé de détecter une potentielle rupture temporelle dans l'évolution des dates d'apparitions des différents stades phénologiques. Cette rupture a pour but de nous indiquer à partir de quelle année la tendance générale change complètement de direction (avance ou retard, accélération ou ralentissement).

4.1.1 **Evaluation du modèle de phénologie.**

Afin de vérifier la pertinence du calcul des dates d'apparition des différents stades phénologiques, nous avons comparé des données de phénologie observées (débourrement, floraison et véraison) dans différents sites du vignoble de Côtes-du-Rhône avec des données simulées par le modèle phénologique décrit plutôt (Figure 10). Hormis la phase de débourrement qui est systématiquement simulée plus tard que les observations, le modèle phénologique simule les mêmes dynamiques que ce qui peut être observé sur le terrain. Ce décalage entre le modèle de simulation et les observations peut s'expliquer par des raisons :

- D'une part les modèles de débourrement sont moins fiables que les modèles de calcul de la floraison (voir travaux de Garcia de Cortazar-Atauri et al., 2009, Sgubin et al., 2018) ;
- D'autre part, étant donné que l'on simule un stade phénologique en sortie d'hiver et que à cette période les températures journalières sont encore assez faibles et autour des seuils de réponse de la plante, le modèle peut considérer que le stade est atteint, alors que l'observateur ne voit pas de changement significatif dans la plante et tend à retarder la date de débourrement.

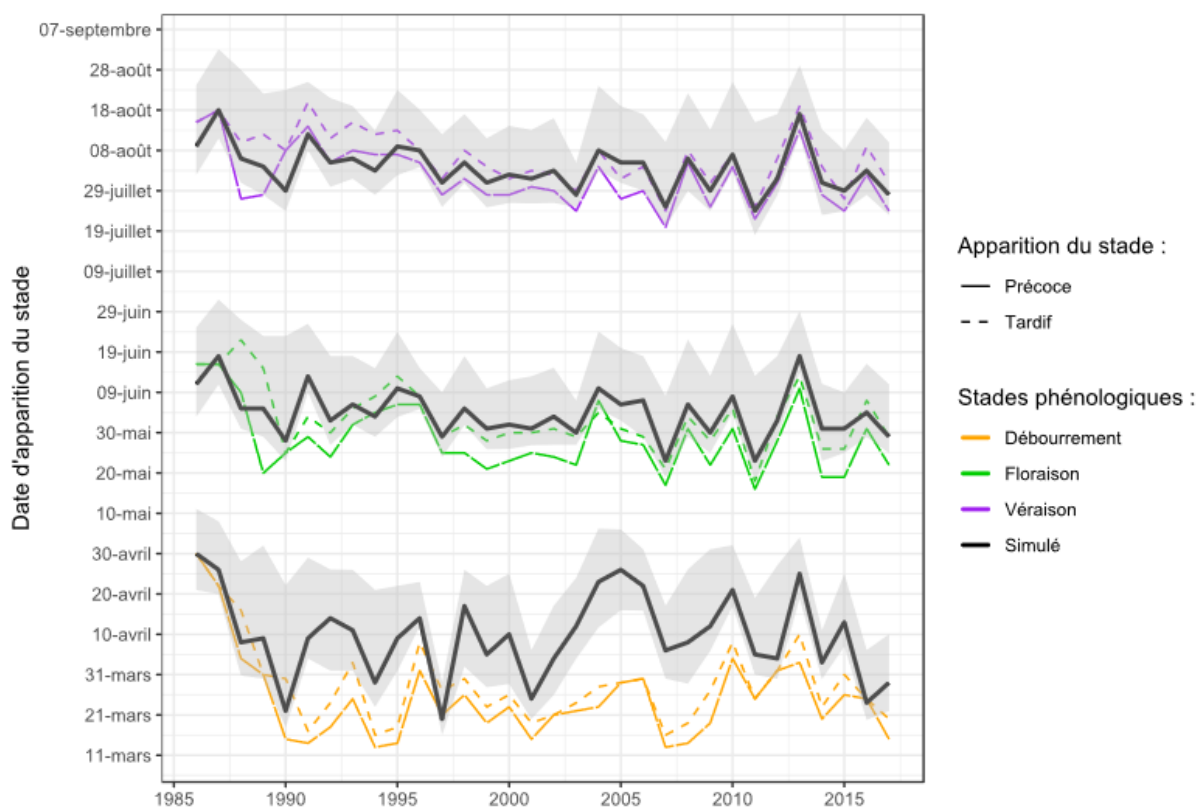


Figure 10. Comparaison entre les dates simulées à partir du modèle de phénologie et les observations sur le terrain (données Groupement de Développement Agricole – Viticole 84). Les valeurs observées sont représentées par deux séries, une précoce et une tardive. Pour représenter les valeurs simulées, nous avons calculé la médiane des 92 mailles Côtes du Rhône (données issues de Dura, 2018) en ne prenant en compte que les mailles avec une altitude inférieure aux 600m. Par ailleurs, afin de représenter la variabilité spatiale de vignoble, nous avons calculé les quantiles 5%-95%.

4.1.2 Evolution temporelle et spatiale de la phénologie et de la vendange.

Les stades de floraison, véraison et vendange connaissent, de manière générale, un avancement dans le temps depuis 1966. La spécificité du territoire du Ventoux fait qu'il peut y avoir jusqu'à une différence de 20 jours entre l'apparition d'un même stade, écart qui ne varie pas en moyenne dans le temps. Le degré d'avancement dans la zone Ventoux n'est pas lié à la position altitudinale des différents territoires mais plutôt au positionnement latitudinal (plus un territoire se trouve au nord plus la tendance à l'avancement sera forte). La Figure 11 et le Tableau 3 montrent l'évolution temporelle de chacune des mailles de la zone d'étude, ainsi que les tendances (en nombre de jours) de l'avancement significatif des dates d'apparitions des stades.

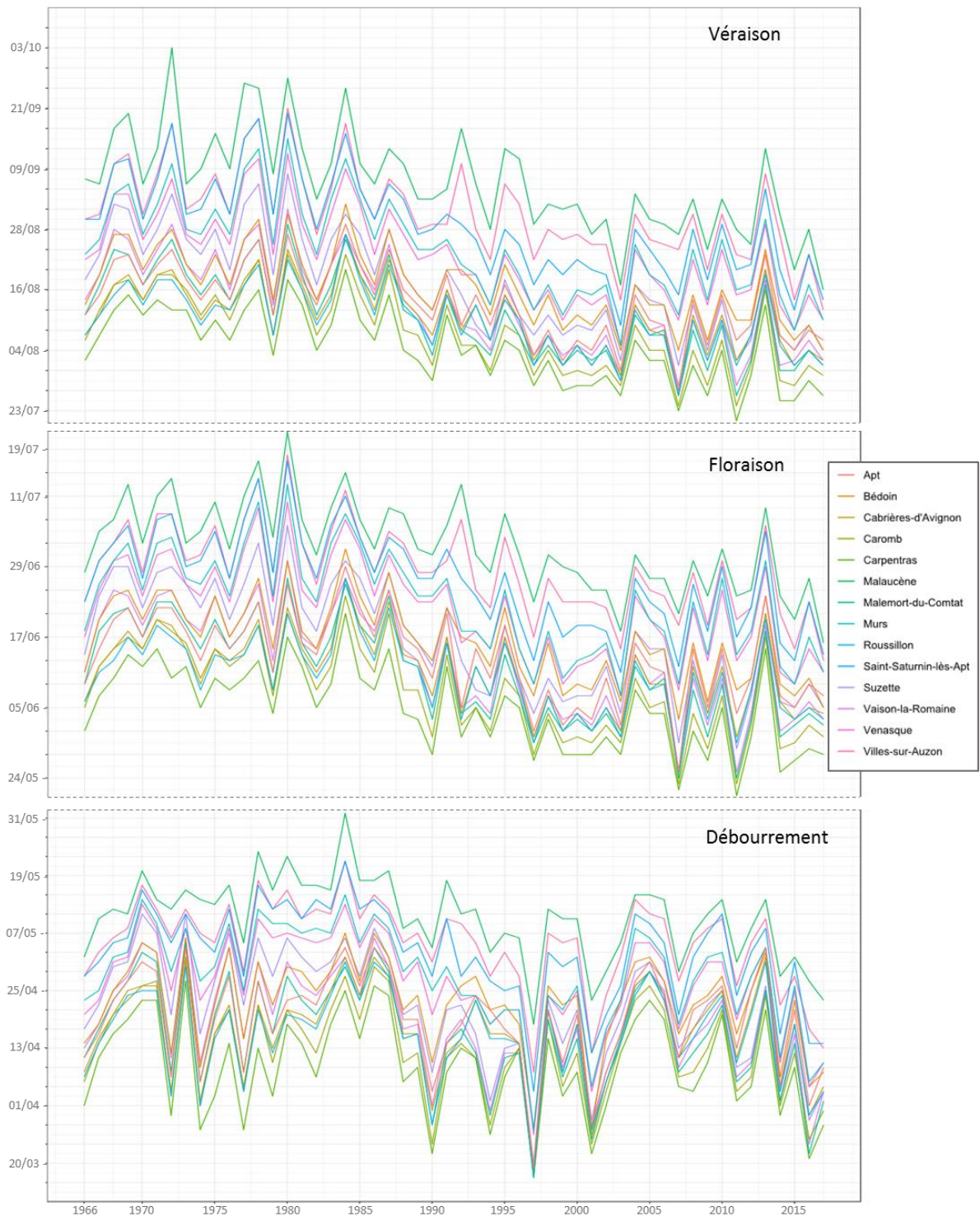


Figure 11. Evolution historique simulée des principaux stades phénologiques (débourrement, floraison et véraison) dans chaque maille de la zone de production Ventoux. Chaque ligne représente une maille, laquelle est identifiée par le nom de la principale commune présente

Tableau 3. Nombre de jours d'avancement des principaux stades de phénologie dans les différents points de maille explorés. Les résultats pour la vendange sont les mêmes que pour la véraison dû à la méthodologie utilisée. Seulement les résultats avec une tendance significative ont été présentés. Pour les secteurs sans information, il peut avoir une évolution, mais celle-ci n'est pas significative.

1966-2017	Evolution des stades phénologies en nombre de jours		
Village	Débourrement	Floraison	Véraison et Vendanges*
Apt		-13.7	-15.2
Bédoin		-14.9	-16.5
Cabrières-d'Avignon		-12.5	-13.9
Caromb		-17.9	-19.6
Carpentras		-15.0	-17.0
Malaucène	-13.6	-17.0	-23.6
Malemort-du-Comtat	-16.2	-21.2	-22.6
Murs	-16.8	-18.7	-22.4
Roussillon		-12.0	-13.4
Saint-Saturnin-lès-Apt	-15.6	-18.3	-23.3
Suzette	-21.7	-23.9	-26.5
Vaison-la-Romaine	-18.0	-22.6	-24.4
Venasque	-15.5	-18.0	-21.4
Villes-sur-Auzon	-13.4	-15.4	-19.3

Depuis 1966, certains territoires connaissent un réel avancement des différents stades avec une grande diversité de situations. Alors que pour le débourrement certains sites ne montrent pas d'avancement significatif, celui-ci est généralisé pour tous les secteurs avec des avancées allant de 13 à 24-26 jours pour la floraison et la véraison. Par exemple, le secteur de Murs a connu en moyenne un avancement de 17 jours pour le débourrement, de 19 jours pour la floraison et plus de 22 jours pour la véraison depuis 1966. D'une manière générale et par rapport à la fin des années 1960, tous les stades se produisent environ deux semaines et demi plus tôt. Les secteurs les plus précoces sont ceux de Carpentras et de Caromb et les plus tardifs ceux de Malaucène et de Villes sur Auzon.

Si l'on s'intéresse à la structure spatiale de ces évolutions, on observe que les secteurs qui sont à une altitude moyenne (entre 300 et 700 m) sont ceux qui montrent un avancement significatif du débourrement (voir Figure 8 et Figure 12). Comme nous l'avons décrit plus haut ce changement est généralisé à la floraison. Cependant le degré d'avancement de la floraison ne concerne pas forcément des zones précises et définies du Ventoux. Bien que l'on observe un léger avancement du stade de floraison dans le sud du Ventoux (Cabrières-d'Avignon, Roussillon et Apt), le reste du secteur Ventoux ne suit pas une logique spatiale. Par exemple, Villes-sur-Auzon connaît un avancement à hauteur de 15 jours depuis 1966 alors que la zone voisine dénommé Malemort-du-Comtat a connu un avancement de 21 jours de la floraison. Enfin, comme indiqué plus haut, la véraison reste le stade qui connaît en moyenne le plus fort avancement. En ce qui concerne la structure spatiale de la véraison, on observe que tous les secteurs avancent significativement, mais que ceux sont les secteurs avec les plus fortes altitudes qui observent le plus forts avancements (Malaucène, Vaison la Romaine, Murs et Saint Saturnin les Apt).

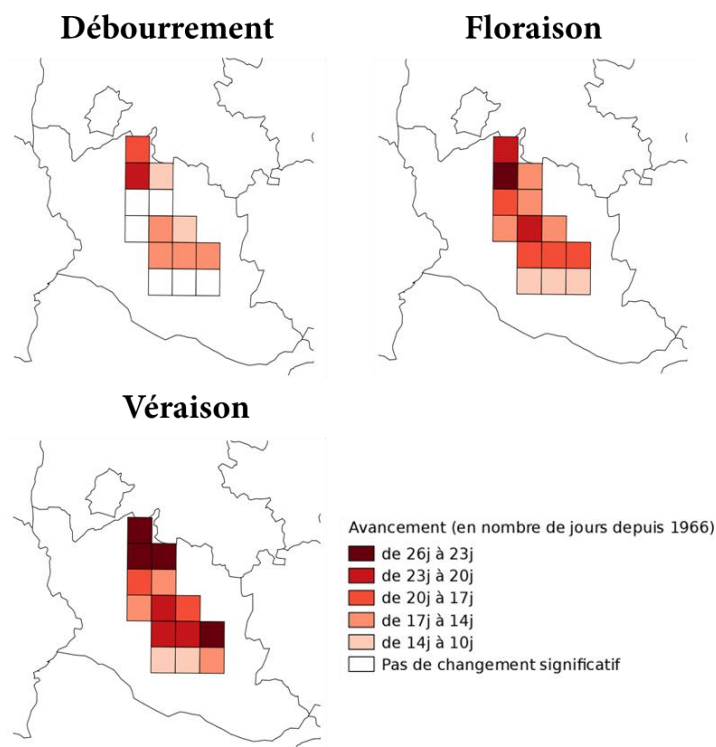


Figure 12. Distribution spatiale des avancements (en nombre de jours depuis 1966) des stades phénologiques dans le vignoble du Ventoux.

Concernant l'évolution temporelle et géographique des dates de vendange, les résultats ne sont pas montrés ici (voir Annexe 2), car ils sont les mêmes que pour le stade de véraison. En effet, la date de vendange est calculée à partir de la date de véraison calculée par le modèle phénologie à laquelle on ajoute 35 jours (voir Figure 8). Pour cette raison les résultats sont strictement les mêmes que pour la véraison mais décalés dans le temps.

4.1.3 Evolution du vignoble du Ventoux par rapport au vignobles de Vaucluse. Tendances et variabilité.

Nous avons voulu comparer les évolutions du vignoble du Ventoux au vignobles du Côtes du Rhône Vauclusien. Pour cela nous avons représenté :

- L'évolution des différents stades phénologiques pour l'ensemble du territoire Ventoux (en prenant en compte sa variabilité) (Figure 13) ;
- L'évolution des valeurs médianes des deux territoires (Ventoux et Côtes du Rhône Vauclusien), ainsi que du secteur le plus précoce du Vaucluse (maille de Bédarrides) (Figure 14) ;
- L'évolution temporelle de la variabilité interne de chaque territoire (Figure 15).

Comme nous avons pu voir dans les figures précédentes, il existe une variabilité climatique importante au sein du territoire Ventoux. Pour représenter cette hétérogénéité nous avons utilisé la figure 12. Elle montre

la tendance de la médiane¹⁶ des valeurs de chaque stade simulé dans chaque secteur, entourée par un ruban qui représente 80% des données du territoire (on élimine les extrêmes).

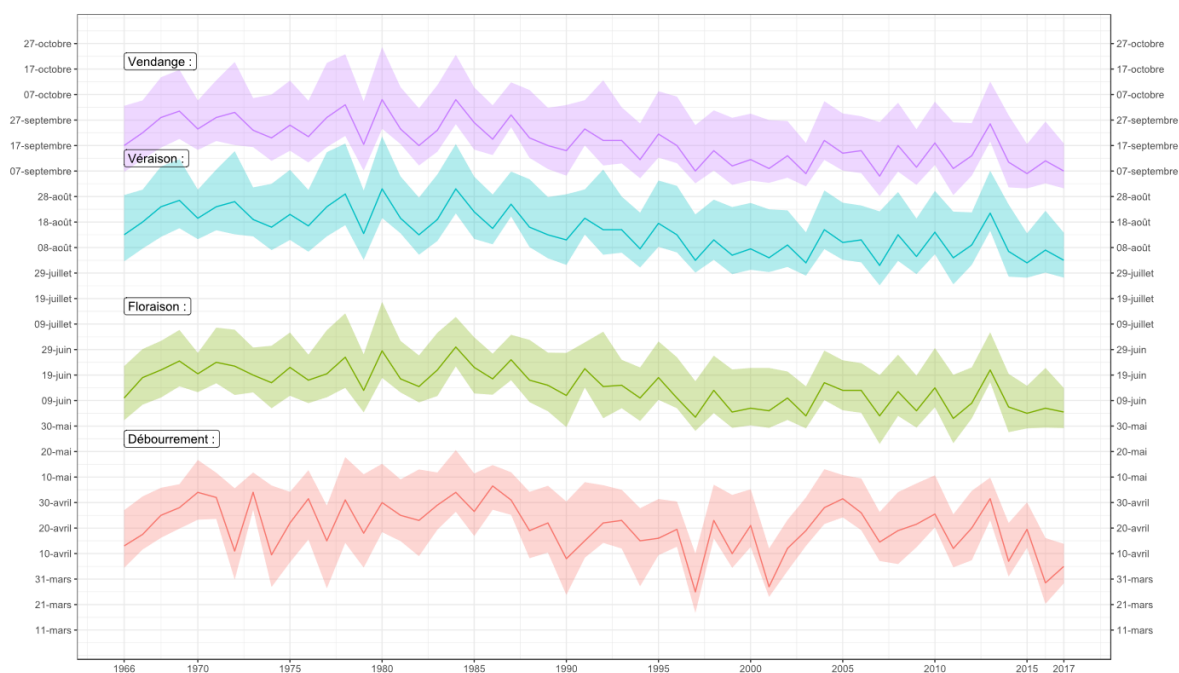


Figure 13. Evolution des stades simulés pour le secteur Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles.

D'une manière générale, et comme nous l'avons déjà montré auparavant, on remarque un avancement généralisé des différents stades dans ces différents territoires. Néanmoins, cette évolution n'a pas été constante. Si au lieu de regarder la période complète (en prenant en compte les dernières 51 années), nous réduisons la période d'étude et que nous ne regardons que les 30 dernières années, aucun territoire du Ventoux, hormis le secteur de Malaucène, n'a connu de réel avancement des dates d'apparition des différents stades phénologiques (données non montrées). Concernant le débourrement, on observe aussi une légère stabilisation dans les années 2000 – 2013 et à nouveau un léger avancement dans ces dernières années.

La comparaison des trois secteurs permet de mettre en évidence une tardiveté plus forte des vignobles sur la zone Ventoux (Figure 14). En moyenne on peut voir une différence de 5 jours à 15 jours entre le vignoble du Ventoux et le vignoble Côtes du Rhône Vauclusien avec une tendance au rapprochement depuis la fin des années 1980. Cette différence est aussi en train de se réduire avec le secteur le plus précoce du Vaucluse (2 jours en 25 ans). Enfin, nous observons que la médiane du secteur du Vaucluse est aussi de plus en plus proche du secteur précoce, ce qui se traduit par une diminution de la variabilité climatique dans ce secteur.

¹⁶ 50% des zones du Ventoux se trouvent en dessous et au-dessus de cette valeur.

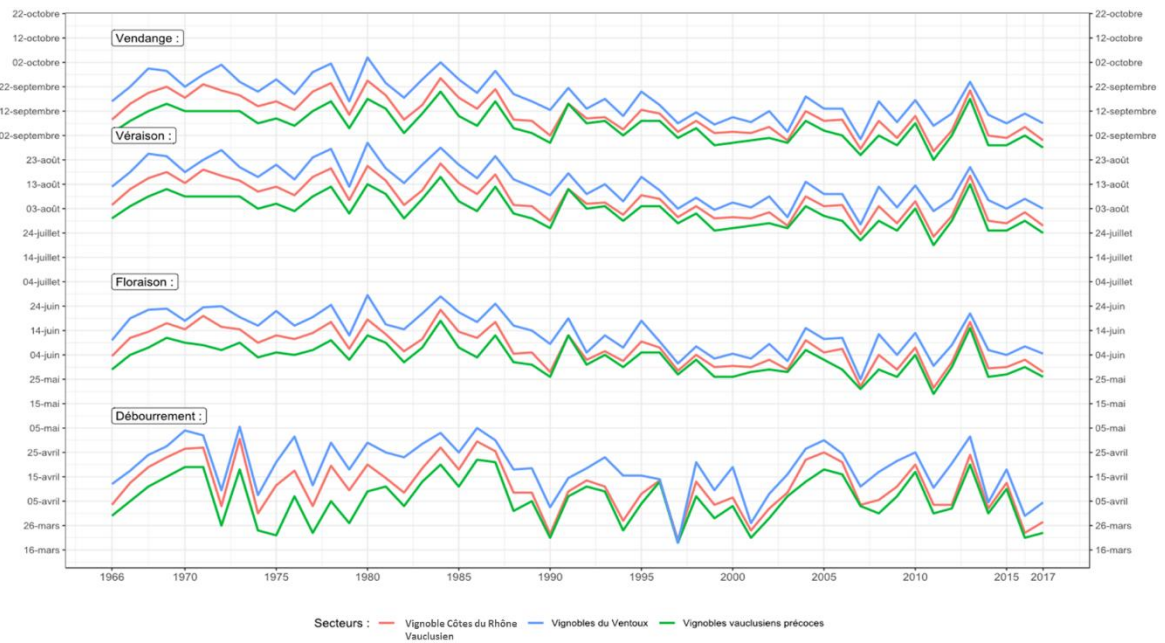


Figure 14. Tendances des stades simulés par le modèle pour le vignoble du Ventoux (ligne bleue), le vignoble Côtes du Rhône Vauclusien (ligne rouge) et secteur le plus précoce du vignoble vauclusien (ligne verte). Les lignes représentent les valeurs médianes de chaque territoire, sauf pour la ligne verte qui représente la valeur du seul secteur le plus précoce.

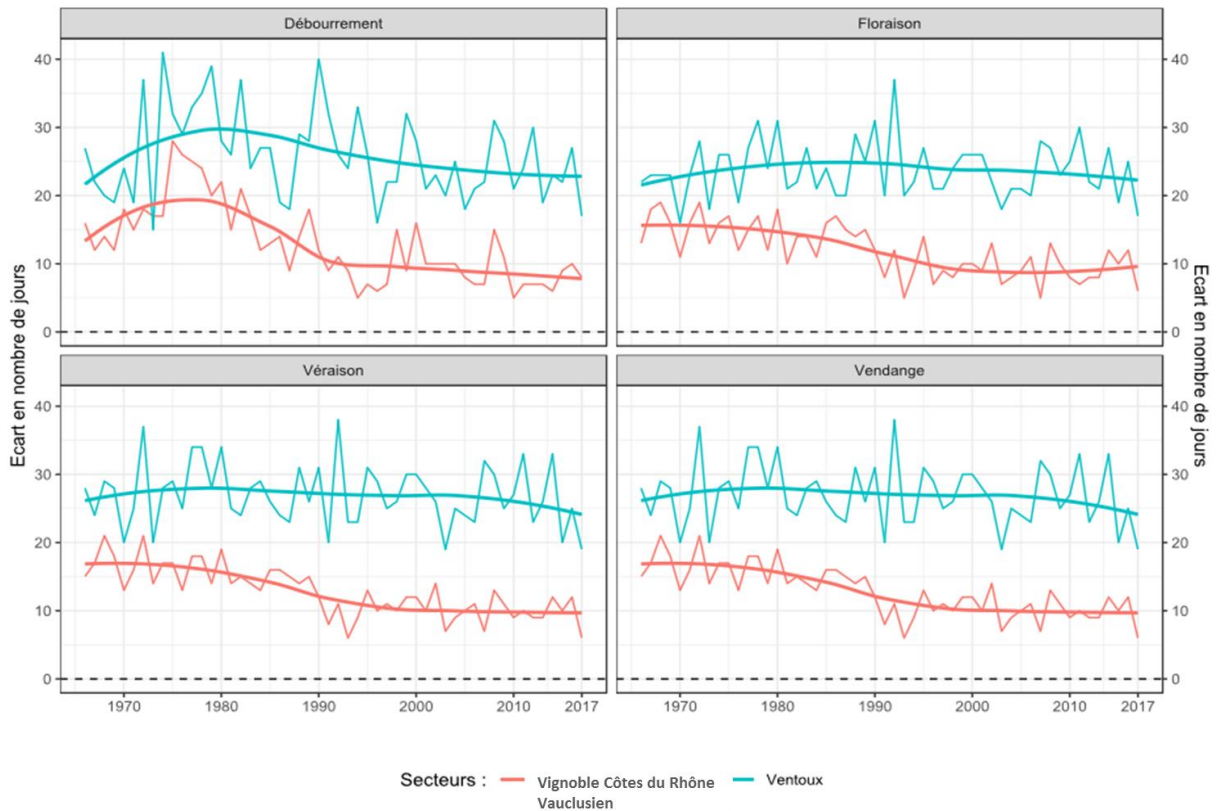


Figure 15. Evolution temporelle de l'écart en nombre de jours entre le secteur le plus précoce et le plus tardif du vignoble du Ventoux (en bleu) et du vignoble du Vaucluse (en rouge). Les traits pleins représentent les régressions locales non paramétriques de chaque jeu de données simulé (méthode LOESS).

La Figure 15 montre que le vignoble du Ventoux est beaucoup plus hétérogène, climatiquement parlant, que le vignoble Vauclusien étudié. Cette hétérogénéité se traduit par une forte différence de précocité entre les secteurs tardifs et précoces du même vignoble. Ainsi les écarts de précocité sont d'environ 25 jours en moyenne entre les secteurs les plus précoces et les plus tardifs de la zone Ventoux, indépendamment du stade observé. Néanmoins, on observe une légère diminution de cet écart pour les stades véraison et vendanges) depuis 1966 (environ 6 jours). Cela signifie qu'il y a une diminution de la variabilité climatique interne de ce territoire.

Enfin, en comparaison avec les autres vignobles vauclusiens (qui sont moins hétérogènes que le vignoble du Ventoux), ceux-ci ont montré une diminution très importante de leur variabilité depuis les années 90 qui s'est stabilisée ces dernières années (d'environ 17 jours à 10 jours seulement).

4.1.4 Durée des phases phénologiques

La durée d'une phase correspond à la durée, en nombre de jours, entre deux stades phénologiques. La durée des phases phénologiques permet d'évaluer comment le climat a évolué à l'intérieur des phases : si le climat s'est réchauffé, elles vont se raccourcir (ou s'allonger pour la phase de dormance), s'il s'est refroidi les phases vont s'allonger. Enfin, dans certaines phases de mise en place de rendement, le nombre de jours entre deux stades peut devenir critique pour assurer un rendement minimal.

Dans cette section, nous avons exploré les tendances de quatre phases phénologiques :

- La phase de dormance qui est définie entre le 31 Juillet et la date de dormance calculée par le modèle. Cette phase est pilotée par une réponse de la plante aux températures froides (chilling). Autrement dit, s'il fait froid la date de dormance arrive plus tôt, s'il ne fait pas assez froid (voir chaud) la date de dormance calculée par le modèle peut être retardée. L'intérêt de regarder cette phase est qu'elle nous informe des conditions climatiques en sortie d'été et à l'automne.
- La phase de post-dormance qui est définie entre la date de dormance et la date de débourrement. Cette phase est pilotée par une réponse de la plante aux températures chaudes (en dessus d'un certain seuil). Ainsi, plus il fait chaud, plus rapidement la phase est réalisée.
- La phase de débourrement-floraison qui est calculée entre les deux stades phénologiques cités et qui a une réponse à la température semblable à celle de la post-dormance.
- La phase de floraison-véraison, qui est aussi calculée entre les deux stades phénologiques cités et qui a une réponse à la température semblable à celle de la post-dormance et du débournement-floraison.

Nous n'allons pas décrire l'évolution de la phase véraison-vendange car celle-ci reste constante (35 jours) dans le modèle de phénologie utilisé.

Dans le Tableau 4 et la Figure 16 nous pouvons observer des tendances diverses selon les phases. Ainsi, la phase de dormance montre un rallongement et une variabilité importante dans le territoire. Cette phase a été rallongée significativement d'environ 10 jours pour certains secteurs et l'on voit que tous les secteurs sont en train de se regrouper sauf ceux de Malaucène et de Ville sur Auzon qui restent les plus frais. En ce qui concerne la phase de post-dormance, elle montre un raccourcissement très significatif pour pratiquement tous les secteurs (entre 12 et 37 jours selon les secteurs), avec le même type de dispersion que celui observé pour la phase de dormance.

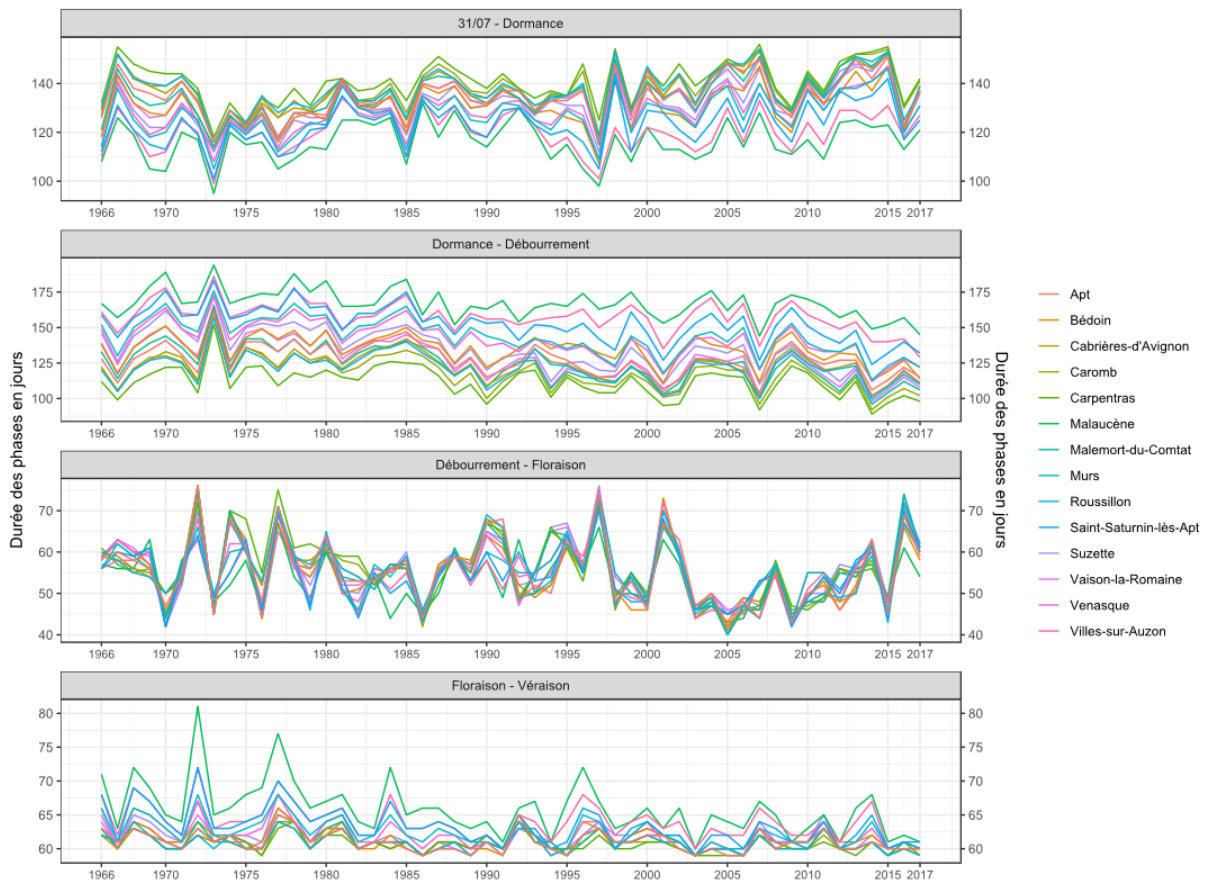


Figure 16. Durée des différentes phases phénologiques sur le territoire du Ventoux. Chaque ligne représente un secteur.

La phase débourrement-floraison montre une très faible variabilité entre les secteurs. On observe aussi une légère tendance au raccourcissement dans certains secteurs (les plus tardifs). Il est intéressant de souligner qu'il y a eu un raccourcissement important de cette phase depuis l'année 2003 (environ 45 jours pour couvrir cette phase), mais qui montre un léger rallongement ces dernières années (avec l'exception de 2015). Enfin, la phase floraison-véraison ne montre aucune tendance significative dans aucun secteur. On observe néanmoins, une diminution de la variabilité interne du vignoble du Ventoux.

Tableau 4. Tendances (allongement ou raccourcissement) des différentes phases phénologiques pour chacun des secteurs du vignoble du Ventoux. Seulement les résultats avec une tendance significative ont été présentés. Pour les secteurs sans information, il peut avoir une évolution (positive ou négative), mais celle-ci n'est pas significative.

Village	Dormance	Port-Dormance	Débourrement - Floraison	Floraison - Véraison
Apt		-16.6 jours		
Bédoin		-16.7 jours		
Cabrières-d'Avignon		-12.7 jours		
Caromb	+11.6 jours	-22.9 jours	-1.6 jours	
Carpentras		-16.0 jours	-1.9 jours	
Malaucène		-17.8 jours	-6.7 jours	
Malemort-du-Comtat	+14.2 jours	-30.4 jours		
Murs	+13.1 jours	-30.0 jours	-3.7 jours	
Roussillon				
Saint-Saturnin-lès-Apt	+11.6 jours	-27.2 jours	-5.0 jours	
Suzette	+15.8 jours	-37.5 jours	-2.6 jours	
Vaison-la-Romaine	+15.7 jours	-33.7 jours		
Venasque	+12.5 jours	-27.9 jours	-3.4 jours	
Villes-sur-Auzon		-18.2 jours	-3.9 jours	

4.1.5 Détection d'une rupture temporelle de la phénologie :

Pour finir cette section autour de la phénologie, nous nous sommes intéressés à identifier (s'il y avait) des périodes de rupture des séries temporelles des stades phénologiques simulés. Ces informations permettent de mettre en perspective de phases d'évolution significativement différentes sur la période historique étudiée. Ce type d'évolution a été étudié plusieurs fois dans la littérature pour la phénologie et pour d'autres variables (comme le rendement) (voir par exemple Menzel, 2000 ou Brisson et al., 2010). Nous avons appliqué la même méthodologie (test de Chow) aux trois stades phénologiques principales (débourrement, floraison et véraison). Les résultats concernant la vendange sont dans l'Annexe 2.

- **Le débourrement**

Concernant le débourrement, nous avons trois situations très contrastées (Figure 17). Les secteurs de Vaison-la-Romaine, Suzette, Malaucène, Venasque, Murs et Saint-Saturnin-lès-Apt connaissent à partir de 1987 une rupture tendancielle dans l'évolution des dates du débourrement. Avant cette date le débourrement devenait de plus en plus tardif et après cette année il montre une tendance à être légèrement plus précoce. Les secteurs de Malemort-du-Comtat et Villes-sur-Auzon connaissent une rupture tendancielle en 2003, mais différente à celle décrite précédemment. Ainsi, les deux secteurs ont connu deux périodes de précocité différentes. De 1966 à 2003 on peut parler de précocité évoluant légèrement d'année en année, alors que de 2003 à 2017 cette précocité est beaucoup plus forte. Enfin, tous les autres secteurs du Ventoux qui ne montraient pas un avancement significatif, ne montrent pas non plus de période de rupture.

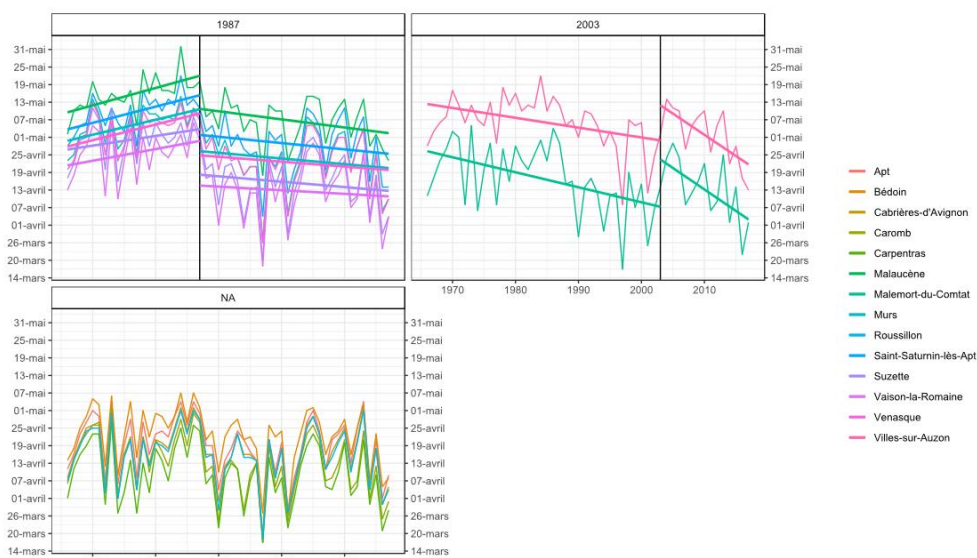


Figure 17. Représentation des ruptures temporelles du débourrement par secteur et par année de rupture identifié en utilisant la méthode de Chow.

- **La floraison**

Concernant la floraison il existe deux grands types de rupture tendancielle qui se sont produites à différentes années selon les secteurs (Figure 18). Ainsi, d'une part, les ruptures détectées en 1991-1992 en Saint-Saturnin-lès-Apt, Venasque, Murs et Apt ne définissent pas un changement de tendance mais un changement brutal de seuil. Par exemple, à Saint-Saturnin-lès-Apt la floraison avait lieu début juillet avant l'année 1990, et elle a avancé d'environ 10 jours à partir de 1992 et il n'y a pas eu de modification significative depuis.

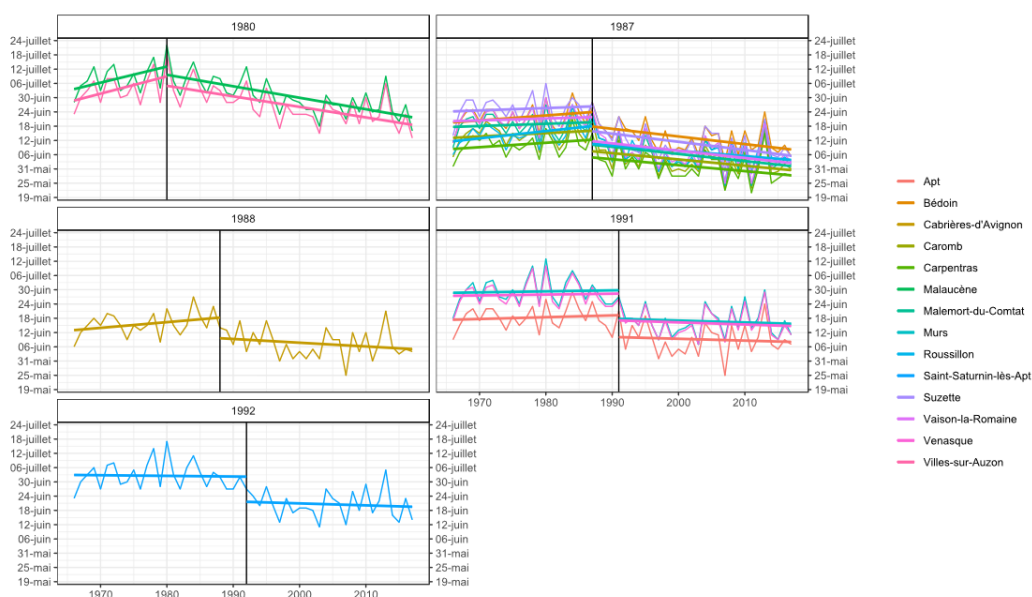


Figure 18. Représentation des ruptures temporelles de la floraison par secteur et par année de rupture identifié en utilisant la méthode de Chow.

L'autre grand groupe est représenté par les secteurs qui ont eu des ruptures les années 1980, 1987 et 1988. Avant ces années tous ces secteurs montraient un certain retardement (ou une légère stabilité) de la date de floraison. Par contre, après ces années on observe une tendance à l'avancement de la date de floraison.

- **La véraison**

Concernant la véraison, un peu plus de 70% du territoire Ventoux connaît une rupture tendancielle entre 1987 et 1988 (Figure 19). Cette rupture définit une première période dite de plafonnement pendant laquelle les dates d'apparitions de la véraison ne changent pas en moyenne. Passé l'année de rupture, la véraison devient de plus en plus précoce. Le secteur d'Apt montre une rupture en 1996, et à partir de cette date on observe même un léger retardement (non significatif). Enfin, les secteurs de Malaucène, Villes sur Auzon et Bédoin ne montrent aucune rupture, mais un avancement constant au cours de toute la période.

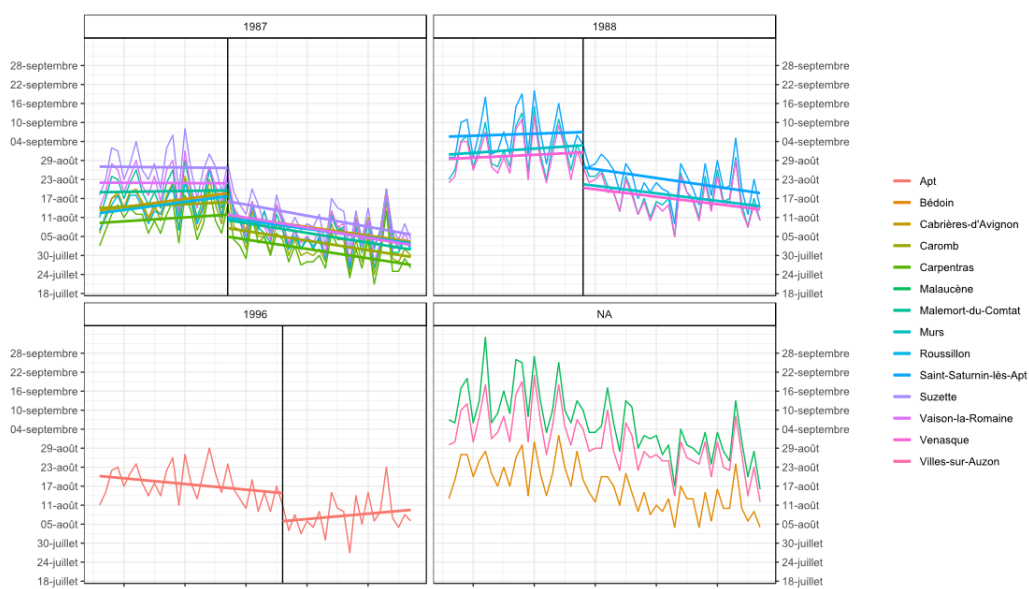


Figure 19. Représentation des ruptures temporelles de la véraison par secteur et par année de rupture identifié en utilisant la méthode de Chow.

4.2 Evaluation des conditions climatiques à l'aide d'indicateurs écoclimatiques

Suite à l'analyse de l'évolution de la phénologie dans le vignoble du Ventoux, nous allons maintenant nous intéresser à l'évolution des conditions climatiques pour la période 1966-2017. Cette analyse est réalisée à partir des indicateurs écoclimatiques calculés par Dura (2018) sur les différentes phases phénologiques, tel qu'il est décrit dans la Figure 9. Ainsi, les indicateurs sont calculés pendant les phases phénologiques décrites auparavant (dormance, post-dormance, débourrement-floraison, floraison-véraison, véraison plus 35 jours), mais aussi autour des principaux stades phénologiques (10 jours avant et après). L'analyse va être réalisée de la façon suivante :

- Nous allons d'abord évaluer l'évolution depuis 1966 des indicateurs qui ont montré des tendances significatives (globalement des indicateurs de température et de pluie) sur chacune des différentes phases. Nous allons représenter l'évolution globale du vignoble du Ventoux et leur variabilité géographique.
- Ensuite, un tableau récapitulatif permettra d'avoir des précisions sur l'évolution des différents indicateurs pour la période 1966 - 2017.
- Finalement, une comparaison entre les différents vignobles du Vaucluse (vignoble du Ventoux, vignoble précoce et vignoble du Côtes du Rhône Vauclusien) permettra de positionner le vignoble du Ventoux parmi le reste du territoire.

Les graphiques montrant les tendances de chacun des secteurs seront disponibles dans l'Annexe 3.

4.2.1 Analyses des principales phases phénologiques

- **Phase post-dormance**

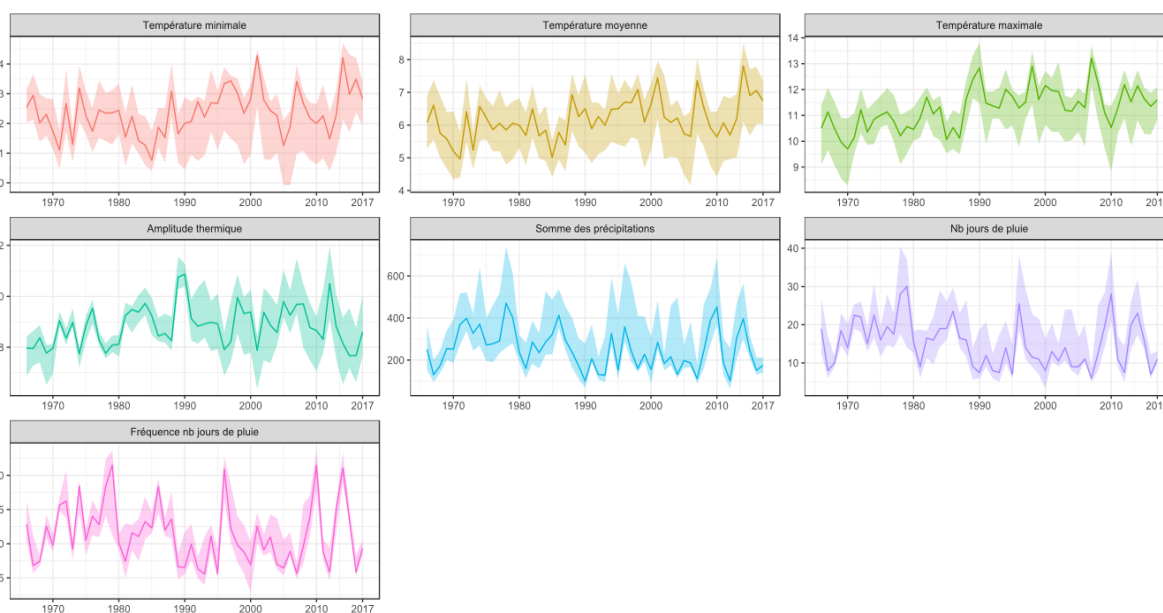


Figure 20. Evolution temporelle des indicateurs de température et de pluie pour la **phase « post-dormance »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

La phase de post-dormance est une phase importante car elle va nous informer des conditions climatiques que la vigne a vécue à la sortie de l'hiver.

Ainsi, nous observons que l'évolution de la température (notamment des températures maximales) a observé une rupture importante à la fin des années 80, avec des augmentations de plus de 1°C de température pour la plupart des secteurs (Figure 20, Tableau 5). Cette augmentation permet d'expliquer en partie l'évolution des dates de débourrement simulées (Figure 13). En parallèle à ces augmentations, certains secteurs montrent une diminution significative du nombre de jours froids (jusqu'à deux semaines en moins si l'on considère une température minimale de -2°C) et de jours frais (jusqu'à plus d'un mois pour des températures minimales inférieures à 1.5°C). Pour autant le risque de gel n'a pas disparu.

On observe aussi que l'amplitude thermique montre une augmentation et ensuite une stabilisation (à la même époque que l'augmentation des températures maximales), mais surtout une augmentation de la variabilité régionale à partir des années 90. Si l'on observe le positionnement de la médiane par rapport à la variabilité du vignoble, on voit que l'on a un déplacement de celle-ci vers le haut de la distribution. Cela signifie que le territoire est en train de se réchauffer, mais aussi que la plupart des secteurs sont en train de se concentrer autour des valeurs les plus chaudes.

En ce qui concerne les indicateurs qui utilisent la pluie comme variable, nous observons une légère rupture non significative vers la fin des années 90. Ensuite, une période plus sèche (moins de pluie cumulée et moins de jours) apparaît au cours des années 90 et 2000, suivie à partir de 2010 de fortes fluctuations (2010 et 2015 très humides, et 2012 et 2016 très secs). Enfin, seulement deux secteurs du nord (Suzette et Vaison) montrent une diminution significative du nombre de jours de pluie (environ 1 semaine).

Comme le montre la Figure 21, le secteur Ventoux est systématiquement plus frais que les autres secteurs étudiés. La différence est très importante lorsque l'on regarde les températures minimales. Par contre, nous pouvons aussi remarquer que cette différence est plus faible si l'on regarde les températures maximales, notamment vis-à-vis de la zone Côtes du Rhône Vauclusien et elle disparaît pratiquement à partir des années 90 entre les trois secteurs comparés. Enfin, on peut souligner que le vignoble du Ventoux montre les plus fortes amplitudes.

Tableau 5. Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température et de pluie pour la phase « **post-dormance** » pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

Village/Secteur	Amplitude thermique moyenne de la phase	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase	Nombre de jours où la température minimale est inférieur à -2°C	Nombre de jours où la température minimale est inférieur à 0°C	Nombre de jours où la température minimale est inférieur à 1.5°C	Nombre de jours de pluie
Apt				+0.7°C				
Bédoin	+2.2°C			+1.7°C				
Cabrières-d'Avignon				+0.7°C				
Caromb			+0.9°C	+1.4°C			-15.8 j	
Carpentras				+1.3°C				
Malaucène	+1.8°C			+1.5°C				
Malemort-du-Comtat		+1.2°C	+1.2°C	+1.6°C	-12.8 j	-17.4 j	-26.0 j	
Murs		+1.4°C	+0.9°C		-12.5 j	-22.1 j	-19.6 j	
Roussillon	+1°C			+0.8°C				
Saint-Saturnin-lès-Apt			+0.7°C				-21.4 j	
Suzette		+1.7°C	+1.4°C	+1.6°C	-18.7 j	-26.8 j	-36.4 j	-7.6 j
Vaison-la-Romaine		+1.4°C	+1.3°C	+1.7°C	-15.2 j	-21.4 j	-29.8 j	-6.5 j
Venasque		+1.2°C	+0.8°C			-20.3 j	-24.6 j	
Villes-sur-Auzon	+1.6°C			+1.4°C				

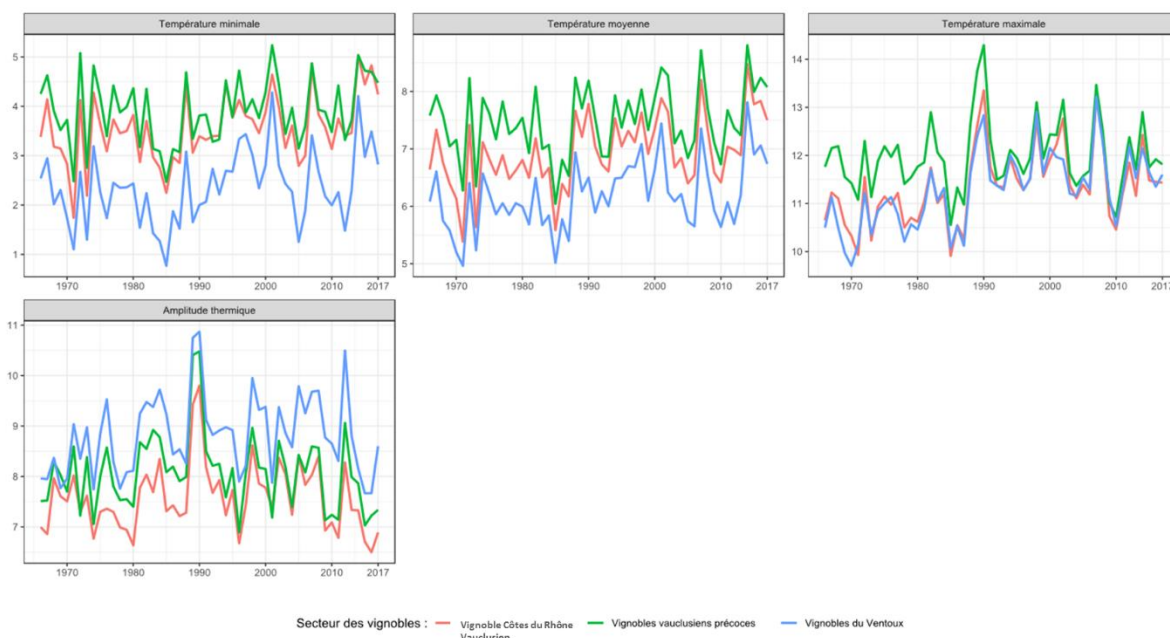


Figure 21. Evolution des indicateurs de température pour la **phase « post-dormance »** pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vauclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleu) et du vignoble de Côtes du Rhône Vauclusien (ligne orange), et la valeur annuelle du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

- **Phase débourrement – floraison**

Pendant la phase débourrement – floraison (printemps), les tendances des différents indicateurs étudiées sont quasiment inexistantes. On observe une légère augmentation des températures minimales, mais qui disparaît ces dernières années.

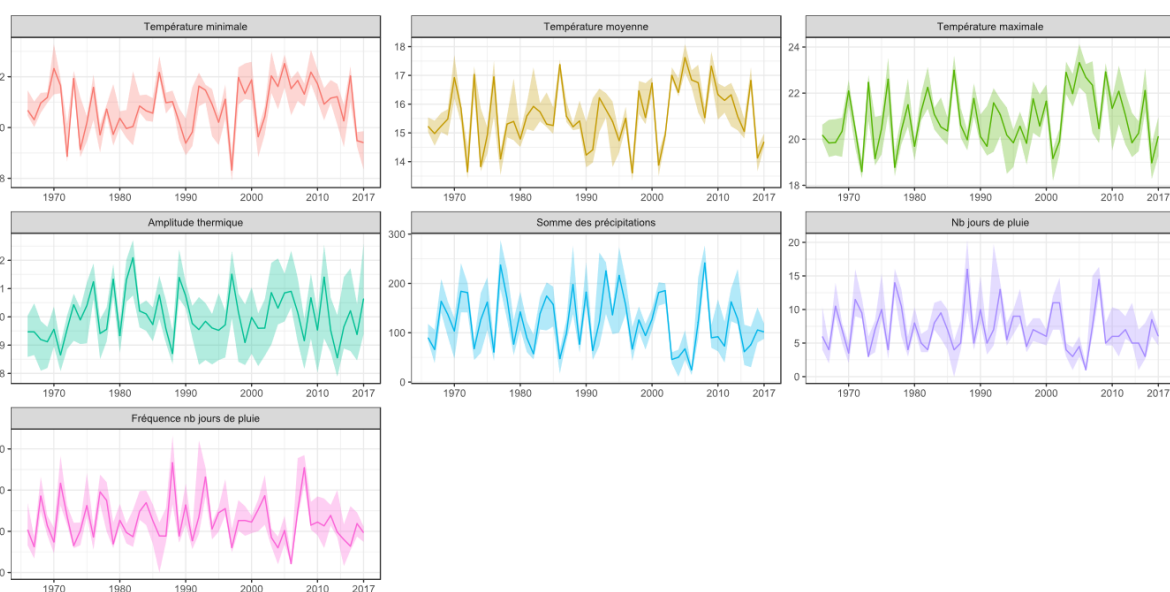


Figure 22. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase « débournement-floraison »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

En parallèle, les températures maximales montrent une rupture au début des années 2000, mais qui est suivie d'une tendance à la baisse. D'une manière générale, nous observons des évolutions significatives de la température dans très peu des secteurs étudiés (Bédoin, Carpentras, Malaucène, Roussillon et Villes sur Auzon). Ceci se traduit par des conditions climatiques qui suivent une variabilité interannuelle mais qui ne montrent pas de tendance particulière (Figure 22, Tableau 6).

En ce qui concerne les indicateurs calculés à partir de la pluie, ils ne montrent pas non plus de tendance particulière, mais plutôt une très forte variabilité interannuelle.

Tableau 6. Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température et de pluie pour la phase « débourrement-floraison » pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

Village/Secteur	Amplitude thermique moyenne de la phase	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase
Apt				
Bédoin	+1.2°C			
Cabrières-d'Avignon				
Caromb				
Carpentras				+1.4°C
Malaucène	+1.7°C	-0.9°C		
Malemort-du-Comtat				
Murs				
Roussillon				+1.4°C
Saint-Saturnin-lès-Apt				
Suzette				
Vaison-la-Romaine				
Venasque				
Villes-sur-Auzon	+1.2°C			

Si l'on regarde la Figure 23, il est remarquable d'observer l'alignement des trois secteurs étudiés pour les différentes températures. Il n'existe pas de hiérarchie entre les régions en ce qui concerne les températures minimales, moyennes et maximales de cette phase. Les trois secteurs montrent pratiquement les mêmes valeurs et les mêmes évolutions. Il y a seulement une très légère différence concernant l'amplitude thermique, laquelle est un peu plus importante dans le secteur du Ventoux.

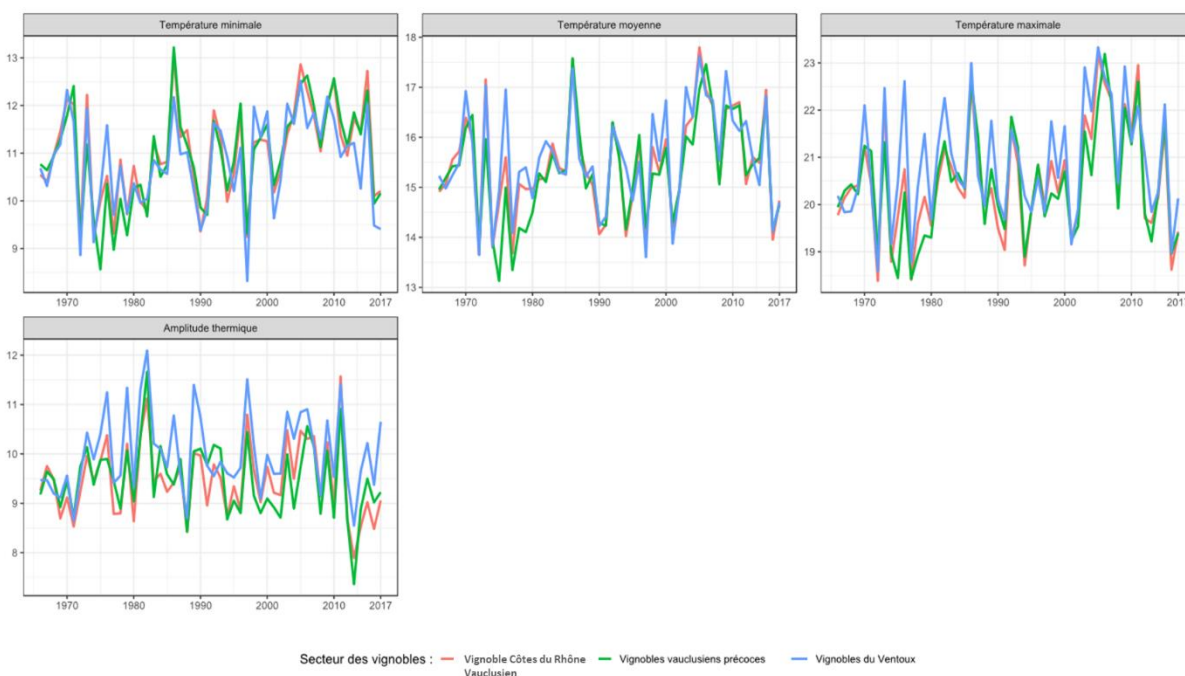


Figure 23. Evolution des indicateurs de température pour la **phase « débournement-floraison »** pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vauclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. . Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleu) et du vignoble de Côtes du Rhône Vauclusien (ligne orange), et la valeur annuelle du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

- **Phase floraison – véraison**

Contrairement à la phase précédente, la phase « floraison-véraison » montre des augmentations très significatives, notamment en ce qui concerne les températures minimales. Ainsi, tous les secteurs montrent une forte augmentation allant depuis 1°C jusqu'à plus de 3°C (Murs et Suzette) (Tableau 7).

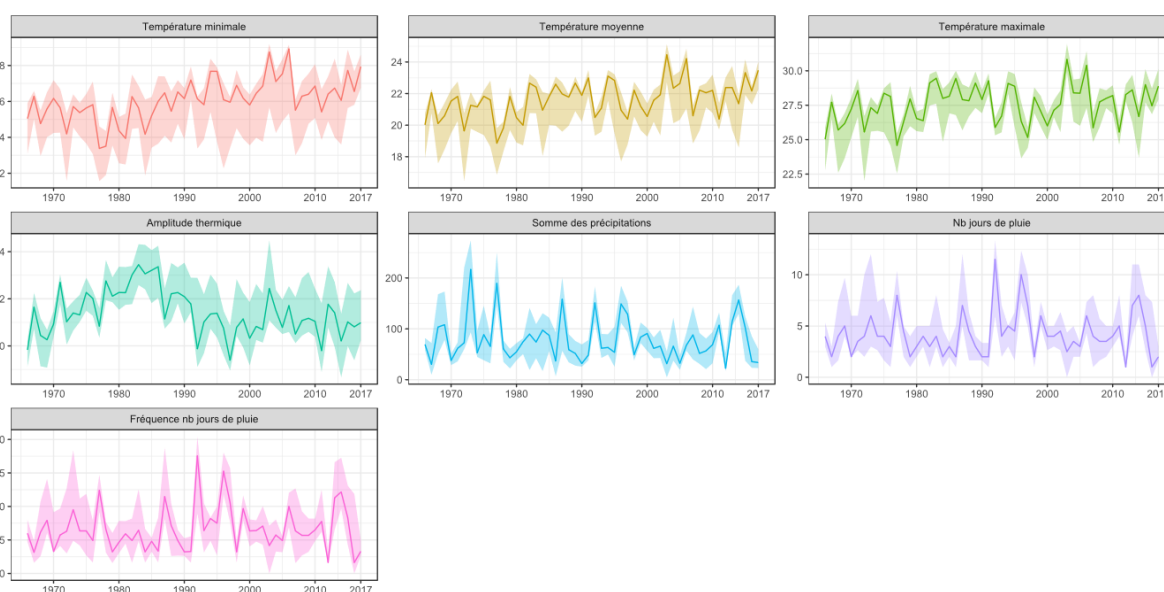


Figure 24. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase « floraison-véraison »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

Par ailleurs, nous pouvons remarquer que les températures présentent une plus forte variabilité régionale (le ruban coloré est plus large - Figure 24), alors que cette variabilité entre les différents secteurs est bien plus faible pour les températures maximales, et elle tend même à diminuer d'avantage ces dernières années. La tendance à l'augmentation des températures moyennes est surtout pilotée par l'évolution des températures minimales. Enfin, les températures maximales montrent aussi une tendance à l'augmentation dans certains secteurs avec des valeurs parfois supérieures aux 2°C. Enfin, pendant cette phase les amplitudes montrent une certaine stabilité (sauf dans certains secteurs dans lesquels elle diminue – Malemort du Comtat, Suzette et Vaison la Romaine), malgré une forte augmentation qui pouvait être observée jusqu'à la fin des années 80.

L'autre indicateur qui suit une forte évolution est celui du nombre de jours chauds (ici caractérisés par une température maximale supérieure à 30°C). La plupart des secteurs (sauf dans les secteurs les plus froids et en altitude) montrent une augmentation significative de ce nombre de jours supérieure à 1 semaine.

A l'opposé des indicateurs de température, aucun changement peut être souligné concernant la pluie, ni en nombre de jours ou cumuls de pluie.

Tableau 7. Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température pour la phase « floraison-véraison » pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

Village/Secteur	Amplitude thermique moyenne de la phase	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase	Nombre de jours de forte chaleur (Tmax > 30°C)
Apt		+1.5°C	+1.6°C		+13.0 j
Bédoin		+1.0°C	+1.5°C		+11.6 j
Cabrières-d'Avignon		+1.3°C	+1.5°C		+12.3 j
Caromb		+2.3°C	+1.8°C		+12.0 j
Carpentras		+2.1°C	+2.0°C	+2.0°C	+13.3 j
Malaucène		+2.0°C	+2.5°C	+2.7°C	+7.8 j
Malemort-du-Comtat	-1.4°C	+2.6°C	+1.9°C		
Murs		+3.1°C	+2.4°C	+1.8°C	+9.1 j
Roussillon		+1.3°C	+1.5°C		+12.2 j
Saint-Saturnin-lès-Apt		+2.9°C	+2.6°C	+2.2°C	
Suzette	-2.0°C	+3.1°C	+2.1°C		
Vaison-la-Romaine	-1.8°C	+2.8°C	+1.9°C		
Venasque		+2.9°C	+2.3°C	+1.7°C	+9.6 j
Villes-sur-Auzon		+1.5°C	+2.0°C	+1.9°C	

Si l'on compare ces valeurs à celles obtenues dans les autres secteurs (Côtes du Rhône Vauclusien et secteur précoce), nous observons les mêmes tendances, avec des valeurs absolues plus fortes pour les températures minimales (autrement les températures minimales sont plus élevées dans les autres deux secteurs explorés) (Figure 25). En ce qui concerne les températures maximales et les températures moyennes, nous observons la même situation que pour la phase précédente : les trois secteurs suivent les mêmes évolutions et valeurs pour les températures maximales. Enfin, en ce qui concerne l'amplitude thermique, le vignoble du Ventoux présente la plus importante, et montre une certaine tendance à la diminution, surtout dans les secteurs froids.

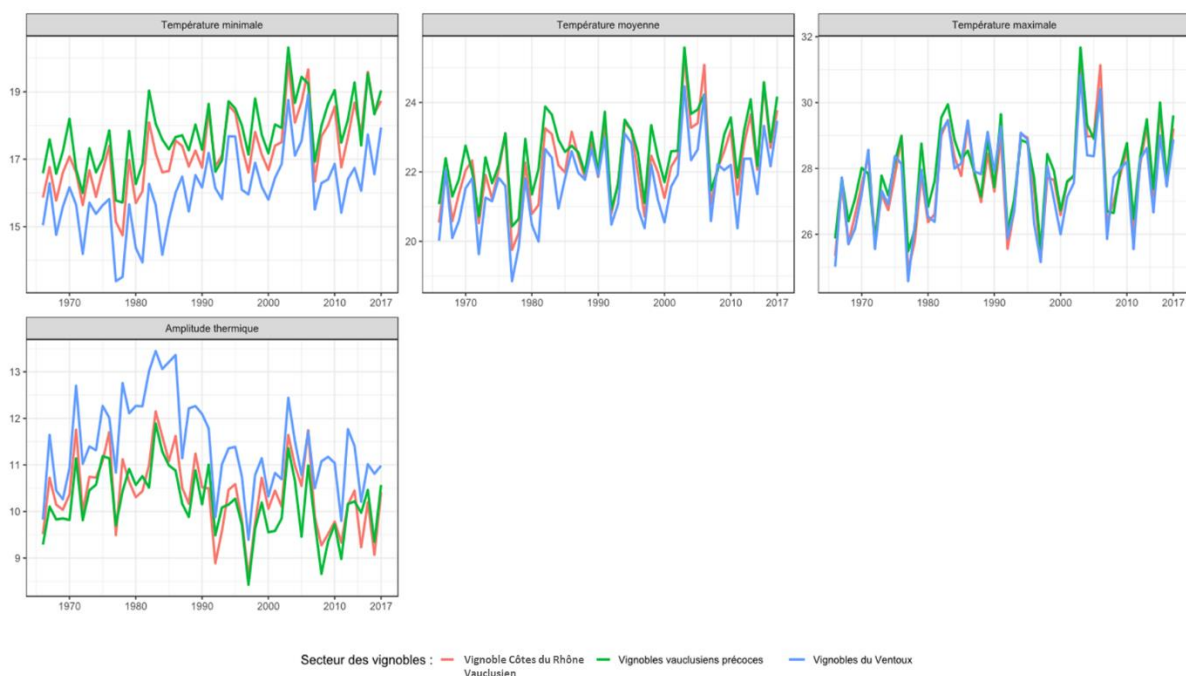


Figure 25. Evolution des indicateurs de température pour la **phase de « floraison-véraison »** pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vauclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleu) et du vignoble de Côtes du Rhône Vauclusien (ligne orange), et la valeur annuelle du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

- **Phase véraison plus 35 jours**

Comme nous l'avons évoqué depuis le début de l'étude, nous n'avons pas calculé la date de vendange, mais une date qui serait 35 jours après la véraison. Ainsi, si l'on prend en compte la phase entre ces deux dates, nous pouvons avoir un aperçu des conditions climatiques pendant la phase de maturité du raisin.

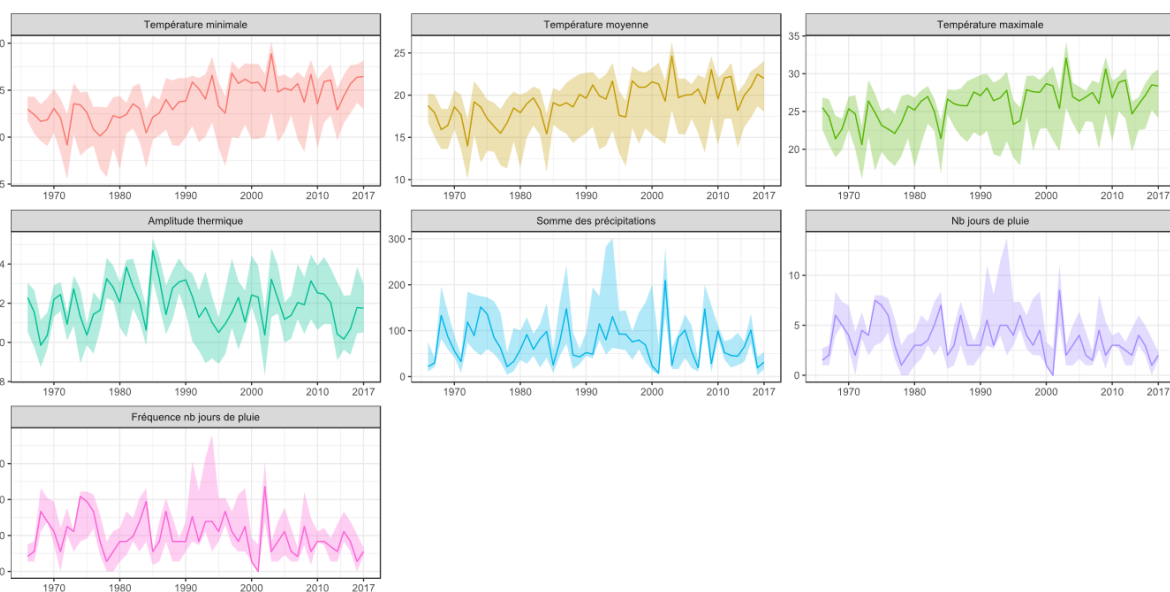


Figure 26. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase « véraison plus 35 jours »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

Cette phase est donc celle qui a vécu les plus forts changements, notamment en ce qui concerne les conditions thermiques (Figure 26, Tableau 8). Ainsi, nous pouvons observer une très forte augmentation de toutes les températures (minimales, moyennes et maximales). Ces augmentations sont très importantes dans les secteurs les plus frais (de 5°C à plus de 6°C selon les températures et les secteurs). Par ailleurs, alors que pour les phases précédentes nous avons observé une certaine diminution de la variabilité locale, il n'est pas de même pour cette phase. Ainsi, nous pouvons observer une forte variabilité dans le vignoble du Ventoux. D'autre part, nous pouvons remarquer que la médiane se situe de plus en plus vers les valeurs les plus élevées (notamment concernant les températures maximales). En parallèle à ces tendances, nous observons une certaine augmentation de la variabilité spatiale des amplitudes (avec des zones à faible amplitude et d'autres avec des amplitudes plus fortes – voir Fig. A10 Annexe 3). Enfin, le nombre de jours chauds a aussi fortement augmenté (jusqu'à deux semaines dans certains secteurs). Si l'on cumule les jours qui ont dépassé 30 degrés dans les deux phases de croissance du raisin (floraison- véraison et véraison plus 35 jours), on peut obtenir dans certains cas une augmentation de presque un mois (Carpentras +29 jours), ce qui n'est pas négligeable en ce qui concerne les conditions thermiques pour la plante.

Concernant la pluie, malgré que l'on n'ait pas observé de tendance significative, nous pouvons remarquer qu'au cours des 20 dernières années nous avons eu moins de jours de pluie, mais leur impact sur les cumuls n'est pas significatif. Par ailleurs, nous n'observons pas non plus de tendance particulière en ce qui concerne la variabilité interannuelle et spatiale.

Tableau 8. Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température pour la **phase « véraison plus 35 jours »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

Village/Secteur	Amplitude thermique moyenne de la phase	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase	Nombre de jours de forte chaleur (Tmax > 30°C)
Apt		+3.4°C	+3.8°C	+4.0°C	+12.2 j
Bédoin	+1.7°C	+3.0°C	+3.7°C	+4.7°C	+12.0 j
Cabrières-d'Avignon		+3.3°C	+3.7°C	+4.1°C	+13.5 j
Caromb		+4.7°C	+4.8°C	+4.9°C	+15.7 j
Carpentras		+3.7°C	+4.0°C	+4.3°C	+16.6 j
Malaucène		+2.9°C	+3.3°C	+4.1°C	
Malemort-du-Comtat		+5.5°C	+5.3°C	+5.1°C	+13.9 j
Murs		+5.7°C	+5.1°C	+4.6°C	+6.2 j
Roussillon		+3.1°C	+3.6°C	+4.1°C	+13.6 j
Saint-Saturnin-lès-Apt		+4.8°C	+4.7°C	+4.6°C	+3.7 j
Suzette		+6.7°C	+6.2°C	+5.6°C	+10.7 j
Vaison-la-Romaine		+5.9°C	+5.7°C	+5.5°C	+13.6 j
Venasque		+5.5°C	+4.9°C	+4.5°C	+7.2 j
Villes-sur-Auzon		+3.2°C	+3.2°C	+3.5°C	+3.8 j

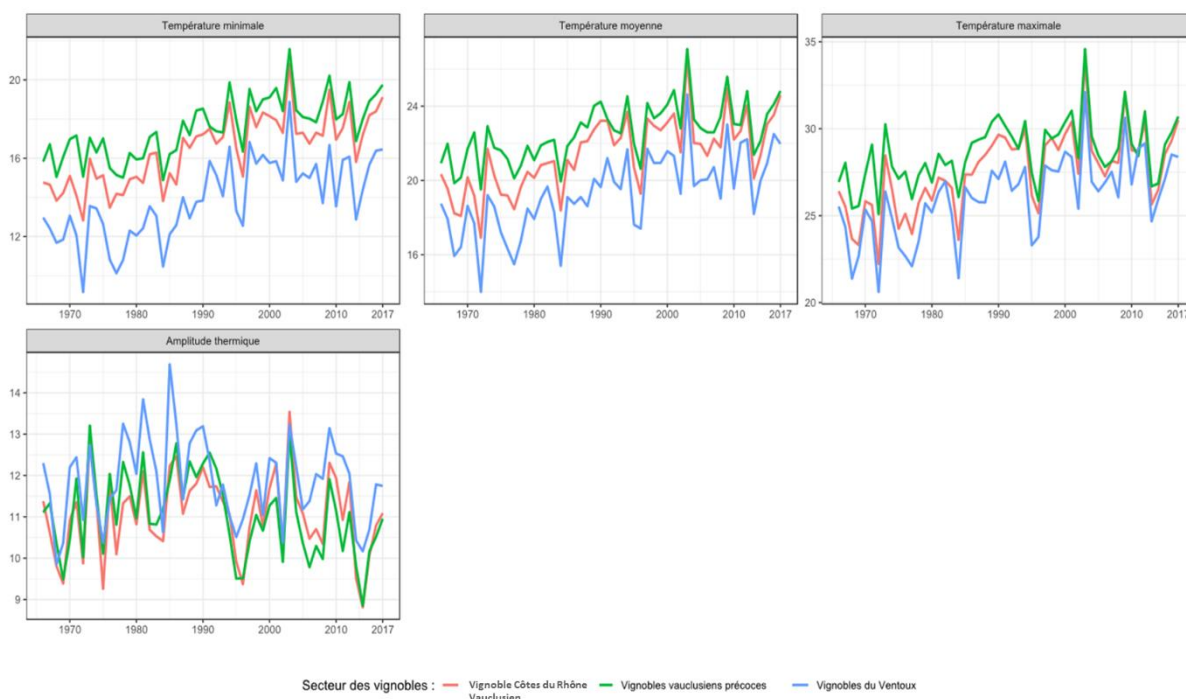


Figure 27. Evolution des indicateurs de température pour la **phase de « véraison plus 35 jours »** pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vauclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleu) et du vignoble de Côtes du Rhône Vauclusien (ligne orange), et la valeur annuelle du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

Si l'on compare le vignoble du Ventoux aux deux autres vignobles adjacents (Figure 27), nous observons qu'ils suivent tous les trois les mêmes tendances, mais que le Ventoux est nettement plus frais que les autres, sauf en ce qui concerne les températures maximales de ces dernières années. Il montre aussi que le vignoble a une plus forte amplitude thermique que les autres vignobles pendant la phase de maturation. Ce dernier point, car plusieurs auteurs ont montré que les effets négatifs des fortes températures (notamment les maximales) peuvent être compensés par une plus forte amplitude thermique, surtout si l'on s'intéresse aux composantes aromatiques et à la couleur (voir Garcia de Cortazar-Atauri, 2006 pour une description plus détaillée de ces questions).

4.2.2 Conditions climatiques autour des stades phénologiques

Dans cette section, nous allons nous focaliser sur l'évolution des conditions climatiques autour des deux stades, le débourrement et la vendange. Les valeurs des indicateurs obtenus pour les autres stades sont décrites dans l'Annexe 4.

- **Autour du stade débourrement**

Les gelées printanières interviennent lorsque la vigne reprend son activité. Des gelées en période de débourrement peuvent impacter les bourgeons et rameaux de la vigne (brunissement et dessèchement). Ci-dessous (Figure 28) la superposition des dates de débourrement et des dernières dates de gel. D'une manière générale, nous observons que la date de débourrement se produit toutes les années après la date du dernier jour de gel (température minimale inférieure ou égale à -2°C). Seulement le secteur de Villesur-Auzon a vécu en deux occasions (1997, 2001) des épisodes de gel (convergence entre les deux dates).

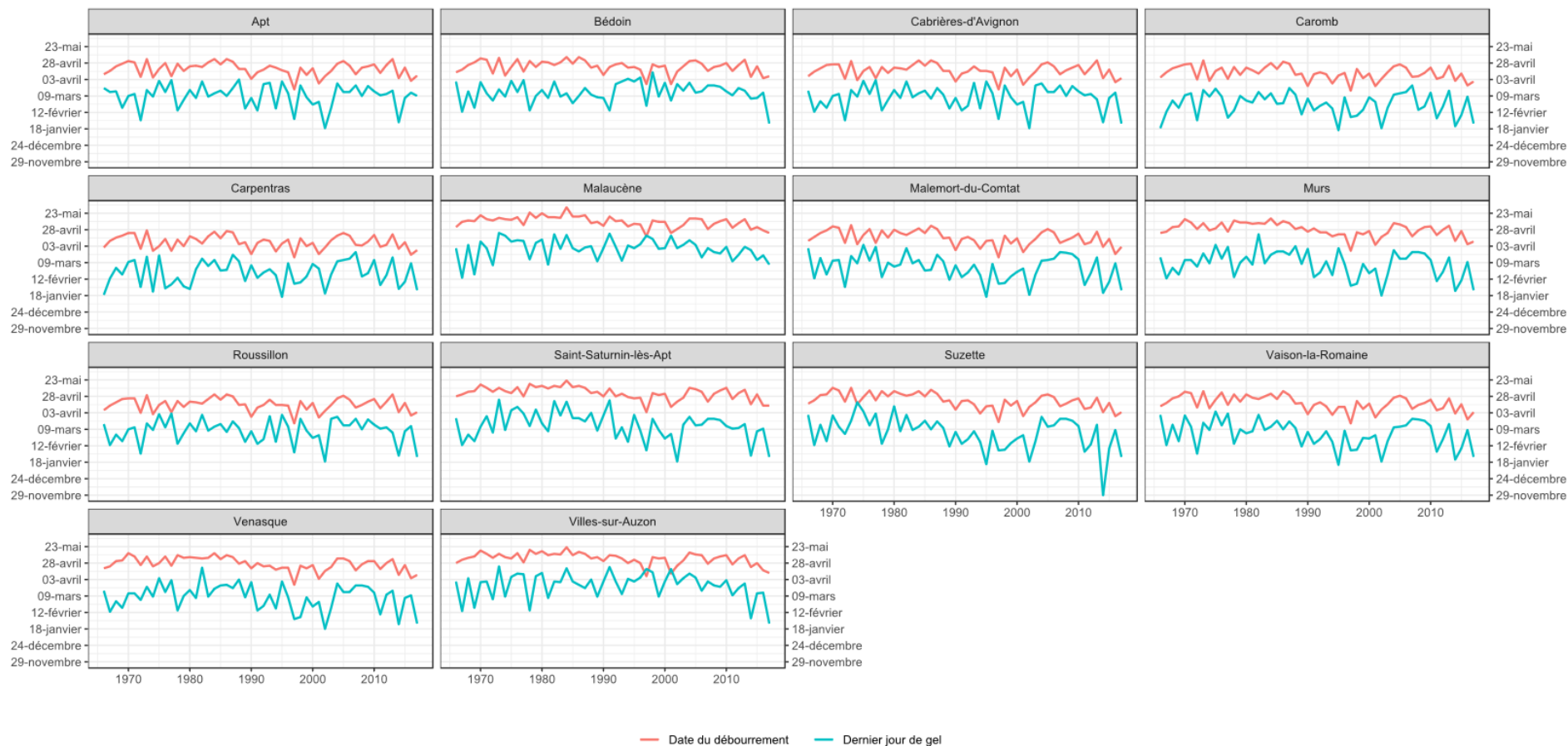


Figure 28. Evolution des dates de débournement et de la date du dernier jour de gel (jour avec une température minimale inférieure à 0°C). La ligne orange représente la date de débournement calculé par le modèle pour chaque secteur du vignoble du Ventoux. La ligne bleue représente la dernière date de gel de chaque secteur du vignoble. Conditions climatiques autour du stade vendange

- **Conditions climatiques au moment de la vendange (35 jours après la véraison)**

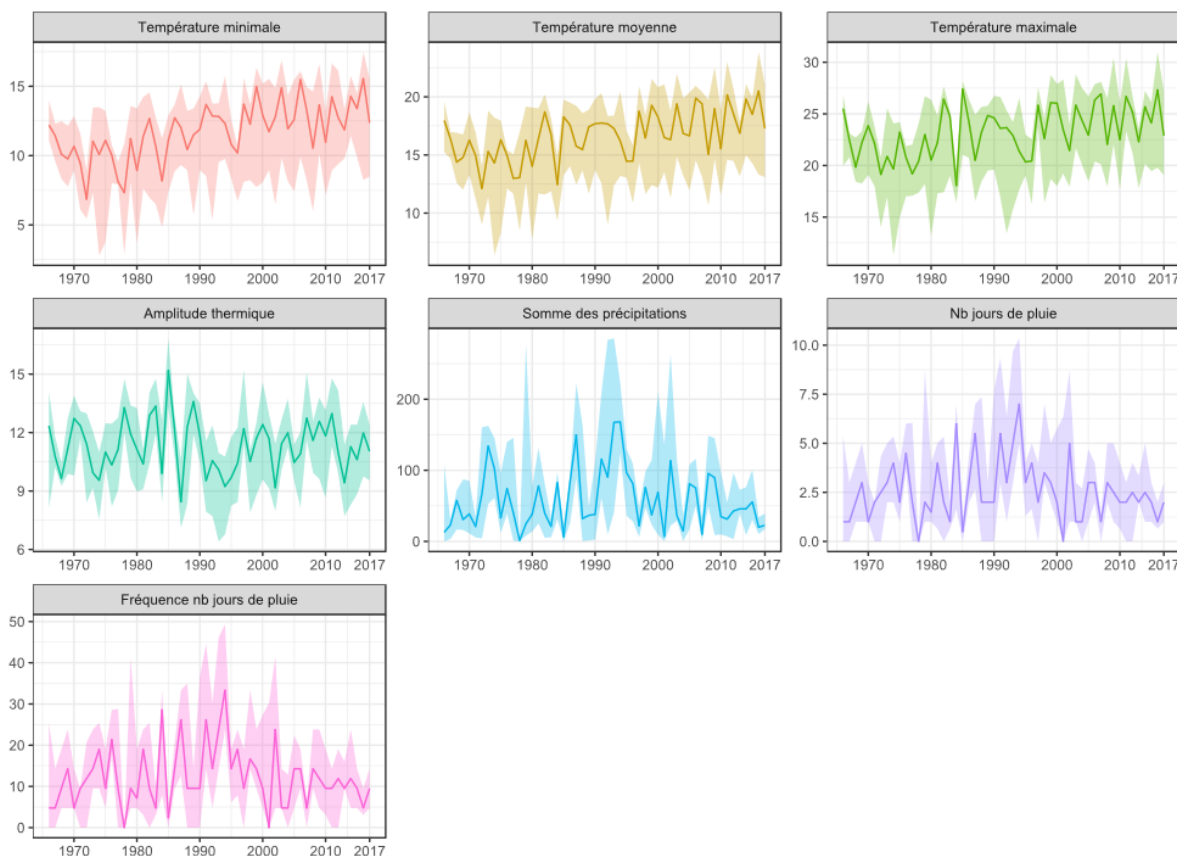


Figure 29. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase « autour de la vendange »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

De la même manière que pour la phase « Véraison plus 35 jours », nous observons une forte augmentation des températures au moment de la vendange (ici les 10 jours avant et après la date de vendange calculée 35 jours après la véraison simulée - voir Figure 9) (Figure 29 et Tableau 9). Ces modifications ne sont pas sans conséquence (positives ou négatives) car elles peuvent fortement affecter la composition du raisin au moment de l'amener à la cave. Cela explique certaines pratiques observées ces dernières années, comme par exemple les vendanges pendant la nuit. Par ailleurs, les différentes températures ne montrent pas les mêmes évolutions. Alors que les températures minimales montrent une évolution quasi constante, les températures maximales montrent une certaine stabilité depuis la moitié des années 90.

En ce qui concerne les indicateurs calculés à partir de la pluie, aucune tendance n'est observée, si ce n'est une légère diminution de la variabilité régionale ces dernières années.

Enfin, si l'on regarde la Figure 30 il existe des différences de température importantes entre les secteurs, même si les tendances sont les mêmes. Ainsi, le vignoble du Ventoux montre les valeurs les plus faibles (jusqu'à 5°C de différence) des trois secteurs. En revanche pas de différence concernant les amplitudes thermiques (contrairement à ce que l'on a observé pour la période de maturation).

Tableau 9. Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température pour la phase « autour de la vendange » pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase	Nombre de jours de forte chaleur (Tmax > 30°C)
Apt	+3.2°C	+3.1°C	+2.7°C	+2.6 j
Bédoin	+2.5°C	+2.6°C	+2.9°C	
Cabrières-d'Avignon	+3.2°C	+3.3°C	+3.2°C	+3.9 j
Caromb	+4.8°C	+4.9°C	+5.0°C	+6.9 j
Carpentras	+3.8°C	+4.3°C	+4.8°C	+8.6 j
Malaucène	+2.7°C	+3.3°C	+4.2°C	
Malemort-du-Comtat	+5.5°C	+5.3°C	+5.0°C	+4.5 j
Murs	+4.5°C	+3.9°C	+3.3°C	
Roussillon	+3.2°C	+3.3°C	+3.3°C	+4.7 j
Saint-Saturnin-lès-Apt	+3.5°C	+3.3°C	+3.1°C	
Suzette	+5.8°C	+5.2°C	+4.6°C	+1.3 j
Vaison-la-Romaine	+5.7°C	+5.3°C	+4.9°C	+3.5 j
Venasque	+4.1°C	+3.6°C	+3.1°C	
Villes-sur-Auzon		+2.2°C		

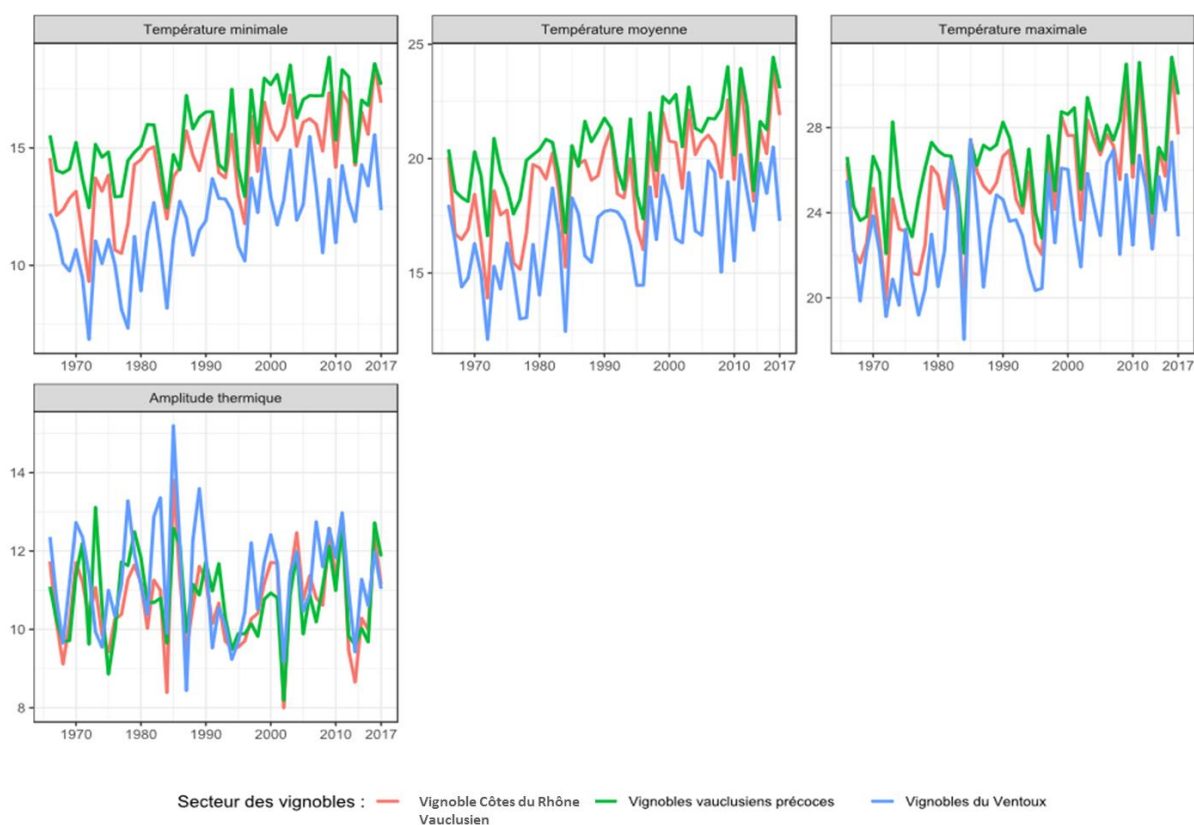


Figure 30. Evolution des indicateurs de température pour la phase « autour de la vendange » pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vauclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleue) et du vignoble de Côtes du Rhône Vauclusien (ligne orange), et la valeur annuelle du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

4.2.3 Analyse du déficit hydrique

Dans cette section, nous allons faire un point sur l'état hydrique de la culture pendant ses différentes phases de développement. Pour cela, nous avons utilisé un indicateur qui évalue le déficit hydrique de la plante. Ce déficit est calculé à partir de deux variables :

- La pluviométrie (en mm) de la période étudiée ;
- L'évapotranspiration potentielle (ETP¹⁷ - mm) de la culture pendant la même période.

La pluviométrie représente l'apport en eau au système, alors que l'ETP représente sa consommation (la transpiration de la plante) et les pertes (l'évaporation du sol). Dans cette image très simplifiée du bilan d'eau du système nous ne prenons pas en compte la structure du sol ni ses différents compartiments. Ainsi, ni le ruissellement ni le drainage sont intégrés dans le calcul. Néanmoins, cette information, même partielle, permet d'informer sur l'état d'équilibre hydrique dans lequel se trouve le système étudié à un moment donné de son développement.

Les valeurs peuvent être positives ou négatives :

- Si le résultat de ce calcul est positif, cela veut dire que le système a reçu plus d'eau que ce qui est potentiellement consommé par la culture (ici la vigne) ;
- Alors que s'il est négatif, cela veut dire que le système a été en déficit (au moins concernant l'eau reçu pendant la période étudiée).

Cette approche ne permet pas par contre d'évaluer l'effet en dynamique car la méthode ne prend pas en compte l'eau disponible dans le sol (dû aux pluies précédentes).

Si l'on s'intéresse à l'évolution du déficit hydrique obtenue (Figure 31 et Tableau 10), nous observons plusieurs tendances assez contrastées selon les phases phénologiques. Ainsi, nous pouvons remarquer une forte variabilité de ce déficit au cours de l'hiver avec une légère tendance à l'augmentation ces dernières années. Pendant la période de démarrage de la végétation (débourrement – floraison) nous pouvons observer la même variabilité et pas de tendance claire.

A partir de la floraison, nous rentrons dans la période dans laquelle le déficit hydrique est le plus important (le système perd plus d'eau par évapotranspiration que ce qui rentre par la pluie). Par ailleurs, nous pouvons observer une certaine tendance à l'augmentation de ce déficit ces dernières années. Enfin, au cours de la période véraison-vendange on observe une diminution significative du déficit hydrique en comparaison avec les phases précédentes : les pluies de septembre et parfois octobre permettent de compenser les pertes par évapotranspiration. Néanmoins, nous observons ces dernières 15 années une augmentation du déficit hydrique pendant cette période (voir Tableau 10). Cela peut s'expliquer par l'avancement de cette période vers de périodes plus chaudes. Ces tendances montrent que la vigne est de plus en plus affecté par l'évolution des conditions thermiques et hydriques, notamment en fin de cycle, sans pour autant négliger l'impact des périodes sèches en hiver et au début printemps. Enfin, la variabilité interannuelle observée est remarquable et elle ajoute de la complexité à la gestion future du système.

¹⁷ La méthode utilisé dans ce travail est celle développé par Allen et al., 1998.

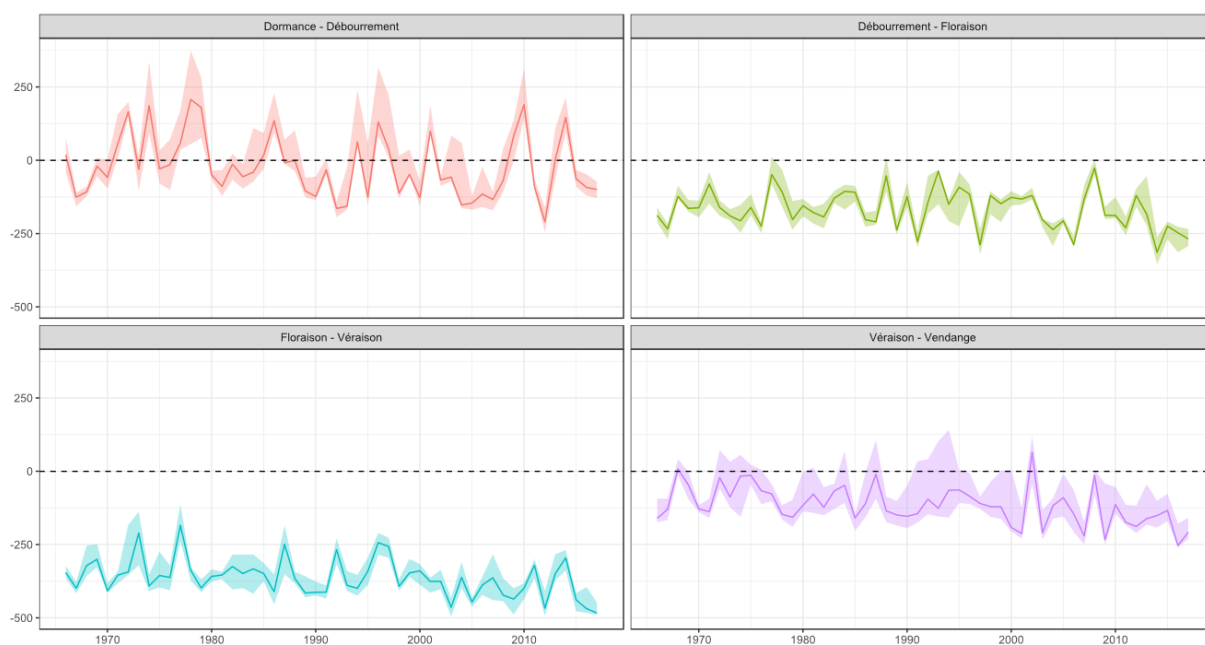


Figure 31. Evolution du déficit hydrique (Pluie - ETP) pour quatre des principales phases de développement du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Le déficit hydrique est calculé en millimètres (mm). Nb = Nombre.

Tableau 10. Valeurs des évolutions significatives du déficit hydrique (Pluie - ETP) pour quatre des principales phases de développement du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017. Le déficit hydrique est calculé en millimètres (mm).

Village	Dormance	Débourrement - Floraison	Floraison - Véraison	Véraison - Vendange
Apt	-	-	-85.80	-92.28
Bédoin	-	-	-	-97.22
Cabrières-d'Avignon	-	-	-70.86	-99.86
Caromb	-	-	-	-106.34
Carpentras	-	-	-	-95.23
Malaucène	-	-	-148.59	-
Malemort-du-Comtat	-	-	-	-106.76
Murs	-	-	-136.81	-93.29
Roussillon	-	-	-68.75	-97.73
Saint-Saturnin-lès-Apt	-	-	-147.79	-
Suzette	-	-	-	-97.44
Vaison-la-Romaine	-	-	-	-106.57
Venasque	-	-	-124.51	-89.80
Villes-sur-Auzon	-	-	-131.61	-

Les points importants

- La phénologie des principaux stades phénologiques dans tous les secteurs du vignoble du Ventoux a été avancée d'environ 2 à 3 semaines dans les 50 dernières années.
- Tous les stades phénologiques montrent des avancements avec une intensité variable. La véraison observe l'avancement le plus fort depuis les années 90.
- Les secteurs les plus froids sont ceux qui ont vu leurs conditions climatiques plus fortement modifiées.
- La modification des phases phénologiques a eu comme impact un changement important des conditions thermiques (augmentation de la température et du nombre de jours chauds) pendant la croissance et la maturation.
- Le vignoble du Ventoux est en train de diminuer sa variabilité climatique, mais il reste le plus frais de tous les secteurs étudiés.
- La pluviométrie, et les autres variables climatiques n'ont pas observé de modification significative sur la même période.
- Le déficit hydrique a connu une augmentation au cours des dernières années dans certains secteurs et surtout vers la fin du cycle, c'est qui peut affecter de manière importante la mise en place du rendement et dans certains cas la qualité finale du raisin (les situations les plus extrêmes).

5 Analyse climatique futur

Après avoir analysé les conditions climatiques passées du vignoble du Ventoux, intéressons-nous à ses conditions climatiques futures. Pour cela nous allons utiliser les données de DRIAS (voir section 3.2). L'utilisation de ces données va nous permettre d'avoir une idée des évolutions possibles du climat dans les années qui viennent selon différents scénarios climatiques. Par la suite, toutes les analyses vont se focaliser sur l'évolution moyenne des différents facteurs (phénologie et indicateurs) sans s'intéresser aux situations ponctuelles de chaque année comme nous avons pu le faire dans l'étude des conditions climatiques passées. En effet, cela est notamment dû au fait que les projections futures ne sauraient être assimilées à des données météorologiques simulées. Par conséquent, nous allons seulement nous intéresser aux tendances.

Dans cette section, nous allons nous intéresser à l'évolution :

- De la phénologie de la vigne dans les différents points de l'étude. Nous allons étudier comment les différents stades phénologiques peuvent évoluer en fonction des différents scénarios et modèles climatiques.
- Des indicateurs écoclimatiques (calculés à l'intérieur de chaque phase phénologique d'intérêt).
- D'un cas d'étude particulier (les mailles de Monieux nord et sud) afin de montrer des opportunités territoriales qui pourraient émerger à l'avenir.

5.1 Etude de la phénologie

Pour étudier l'évolution future de la phénologie, nous avons utilisé le même modèle que nous avons décrit et utilisé dans le chapitre précédent. Ce modèle permet de calculer les principaux stades phénologiques de la plante : le débourrement, la floraison et la véraison ; et la date de récolte est calculée en ajoutant 35 jours à la date de véraison simulée. Enfin, nous avons utilisé les paramètres représentant le cépage Syrah (cépage à précocité moyenne – Parker et al., 2013) pour simuler la phénologie.

5.1.1 Evolution de la phénologie en fonction des différents scénarios et modèles

La Figure 32 montre l'évolution des différents stades simulés en fonction des scénarios climatiques futurs, mais aussi en prenant en compte les deux modèles du climat français. D'une manière générale on observe qu'à l'horizon 2050 il n'y aura pas de changement significatif par rapport à ce que le vignoble du Ventoux a pu connaître depuis les années 1990. On observe des avancements (et des retards), mais surtout une certaine divergence dans les évolutions selon le modèle et le scénario regardé. Ainsi, si l'on analyse les résultats en fonction du modèle, on peut remarquer que le modèle CNRM est celui qui représente au mieux les trois tendances projetées par la plupart des modèles climatiques : pas d'évolution selon le scénario RCP2.6, un léger avancement jusqu'à 2050 et ensuite une stabilisation pour le scénario RCP4.5, et enfin un avancement constant pour le scénario RCP8.5. A contrario, le modèle IPSL montre une plus forte variabilité dans les trajectoires, avec un retard avant 2050 (plus important pour le scénario RCP 8.5), suivi respectivement d'un avancement très fort jusqu'à la fin du siècle pour le RCP 8.5 et d'un retardement progressif important pour le scénario RCP 4.5. Ces tendances sont assez similaires indépendamment des stades phénologiques.

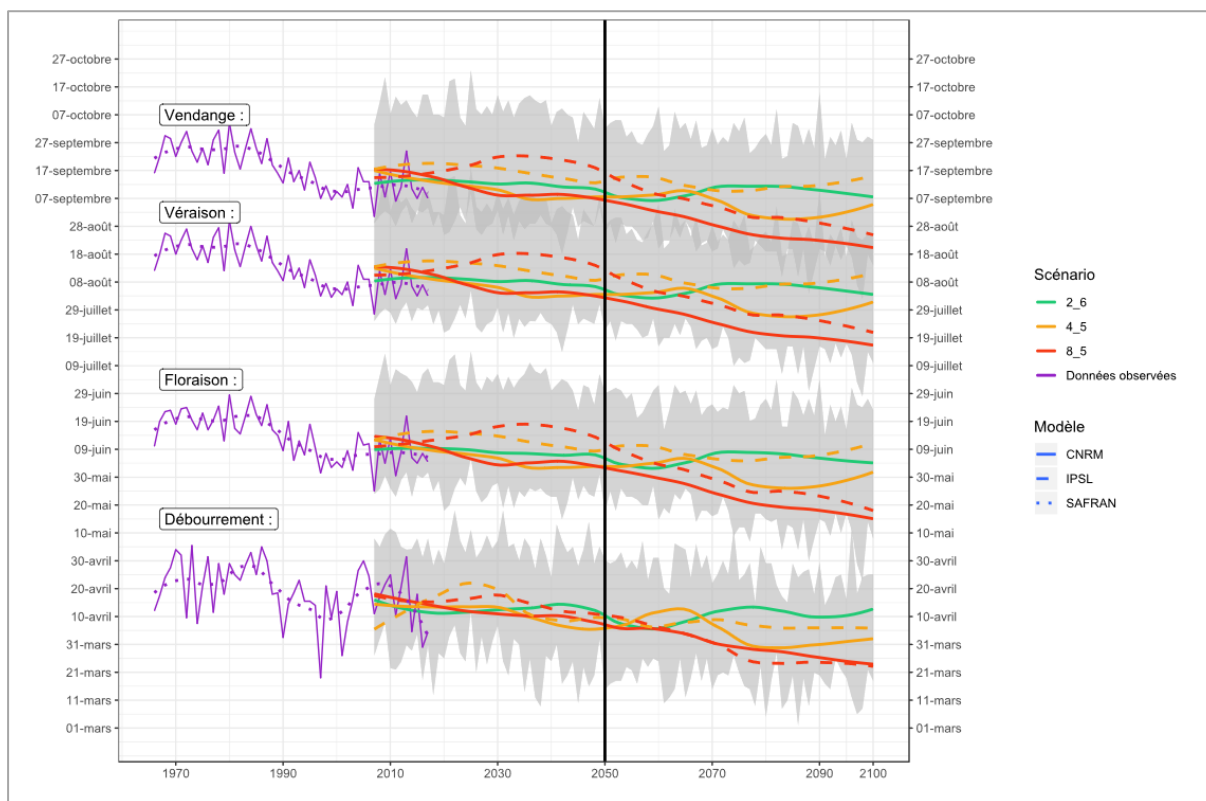


Figure 32. Evolution médiane de différents stades phénologiques et de la date de vendange (véraison plus 35 jours) pour le cépage Syrah du vignoble du Ventoux en utilisant différents modèles climatiques et scénarios. Les couleurs représentent les différentes séries de données utilisées : données observées (violet), ou simulées (vert scénario RCP2.6, orange scénario RCP 4.5, scénario rouge RCP 8.5). Les différents traits représentent les sources de données. Enfin, la zone grisée représente la variabilité calculée entre le 1^{er} et le 9^{im}e décile pour l'ensemble de situations.

Dans le tableau 11 nous avons fait la synthèse de l'évolution significative (avancement en jours) des différents stades phénologiques en regardant deux périodes (2006-2050 et 2006- 2100) et deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5 du modèle CNRM). Ces valeurs confirment les tendances observées dans la Figure 32. A l'horizon 2050, la plupart des secteurs ne montrent pas d'avancement du débourrement, indépendamment du scénario. Néanmoins, cela change radicalement quand on s'intéresse aux stades suivants (floraison, véraison et vendange) et à la fin du siècle. Pour le scénario RCP 4.5, on observe un avancement moyen d'environ deux semaines qui pourrait se maintenir jusqu'à la fin du siècle. Par contre, pour le scénario RCP 8.5 (le plus catastrophique), on pourrait observer un avancement d'environ 2 semaines par rapport aux dates actuelles et de s'amplifier jusqu'à environ 1 mois à la fin du siècle. Ces modifications auront des impacts importants sur le fonctionnement de la plante et les conditions de la maturation du raisin.

Tableau 11. Nombre de jours d'avancement des principaux stades de phénologie (débourrement, floraison, véraison) la vendange (véraison plu 35 jours) dans les différents points de maille explorés. Les résultats pour la vendange sont les mêmes que pour la véraison dû à la méthodologie utilisée. Seulement les résultats avec une tendance significative ont été présentés. Pour les secteurs sans information, il peut avoir une évolution, mais celle-ci n'est pas significative.

Village	RCP 4.5						RCP 8.5					
	Débourrement		Floraison		Véraison et Vendange		Débourrement		Floraison		Véraison et vendange	
	2006 - 2050	2006 - 2100	2006 - 2050	2006 - 2100	2006 - 2050	2006 - 2100	2006 - 2050	2006 - 2100	2006 - 2050	2006 - 2100	2006 - 2050	2006 - 2100
Apt		-15.1		-13.2		-13.5		-22.9	-10.8	-28.9	-12	-29.2
Bédoin		-15.5		-13.5		-14.3		-26	-11.9	-30.6	-13.1	-30.7
Cabrières-d'Avignon		-15.1	-11	-13.8		-13.8		-22.7	-10.2	-27.9	-11.1	-27.9
Caromb		-14.6	-10.8	-14.2	-10.4	-14.3		-23.6	-10.4	-28.7	-11.4	-28.5
Carpentras		-14.6	-10.9	-13.9	-10.5	-13.9		-18.2		-25.7		-25.3
L'Isle-sur-la-Sorgue		-15.2	-12.1	-14.1	-11.5	-13.9		-17.2		-25.6		-25.7
La Roque-sur-Pernes		-14.8	-11.5	-14.1	-10.7	-14.1		-21.3		-27.4	-10.3	-27.3
Malaucène	-15	-19		-16	-13.6	-18.5		-30.5	-14.3	-34.1	-16.7	-36.6
Malemort-du-Comtat		-15.1	-10	-13.9	-9.6	-14.1		-23.6	-11.2	-28.6	-11.7	-28.2
Monieux-Nord	-17.5	-20.6	-13.5	-16.5	-18.6	-23.3		-32.6	-15.9	-34.7	-21	-42.9
Monieux-Sud	-15.7	-20.8		-16.7	-19.2	-22.8		-35.6	-17.9	-40.2	-23.3	-47.2
Murs		-17.7		-15		-15.8		-30.2	-14.1	-34.3	-15.3	-34.5
Roussillon		-15.3	-11	-14.3	-10	-14.1		-21.4		-28.2	-10.9	-28.5
Saint-Saturnin-lès-Apt		-19		-15.4	-13	-17.9		-32.2	-15.3	-34.7	-18.1	-37.6
Suzette		-15.9		-14.2		-14.8		-25.9	-12.1	-31.1	-13.2	-30.6
Vaison-la-Romaine		-15.6	-11.8	-14.4	-11.5	-14.5		-27.4	-11.7	-31	-12.5	-30.9
Venasque		-16.1		-14		-14.7		-27.2	-11.7	-31.1	-12.9	-31.1
Villes-sur-Auzon	-14.7	-18.2		-15.8		-17.7		-31	-15.5	-36.5	-17.2	-37.5

5.1.2 Evolution de la durée des phases

Afin de compléter l'analyse de l'évolution de la phénologie, nous nous sommes aussi intéressés à la durée des phases. La Figure 33 montre l'évolution des différentes phases phénologiques en fonction des deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5 - modèle CNRM). D'une manière générale on observe que la phase de dormance est allongée de manière significative dans les deux scénarios, passant d'environ 120 jours à 160 jours. Cela est notamment dû à l'adoucissement des températures pendant la période automne et hiver dans cette région, ce qui génère que les besoins en froid de la plante s'accroissent plus doucement. En parallèle à cette augmentation, la période de post-dormance suit une tendance significative opposée. Ainsi, l'augmentation des températures en fin d'hiver et début de printemps permettent de compléter beaucoup plus rapidement cette phase : entre 25 et 50 jours plus rapide selon le scénario. Malgré cela, les conditions climatiques locales et leur évolution ne laissent pas imaginer un risque de manque de froid nécessaire pour lever la dormance de la vigne. Par contre, ces modifications pourraient entraîner une augmentation du risque de gel et d'accidents climatiques comme la forte mortalité vécue en 2012 suite à forte diminution des températures pendant la période de reprise du fonctionnement de la plante (températures minimales inférieures à -7°C pendant quelques jours début du mois de février). Face à ces tendances très fortes, les phases « débourrement-floraison » et « floraison-véraison » ne sont pas modifiées de manière significative.

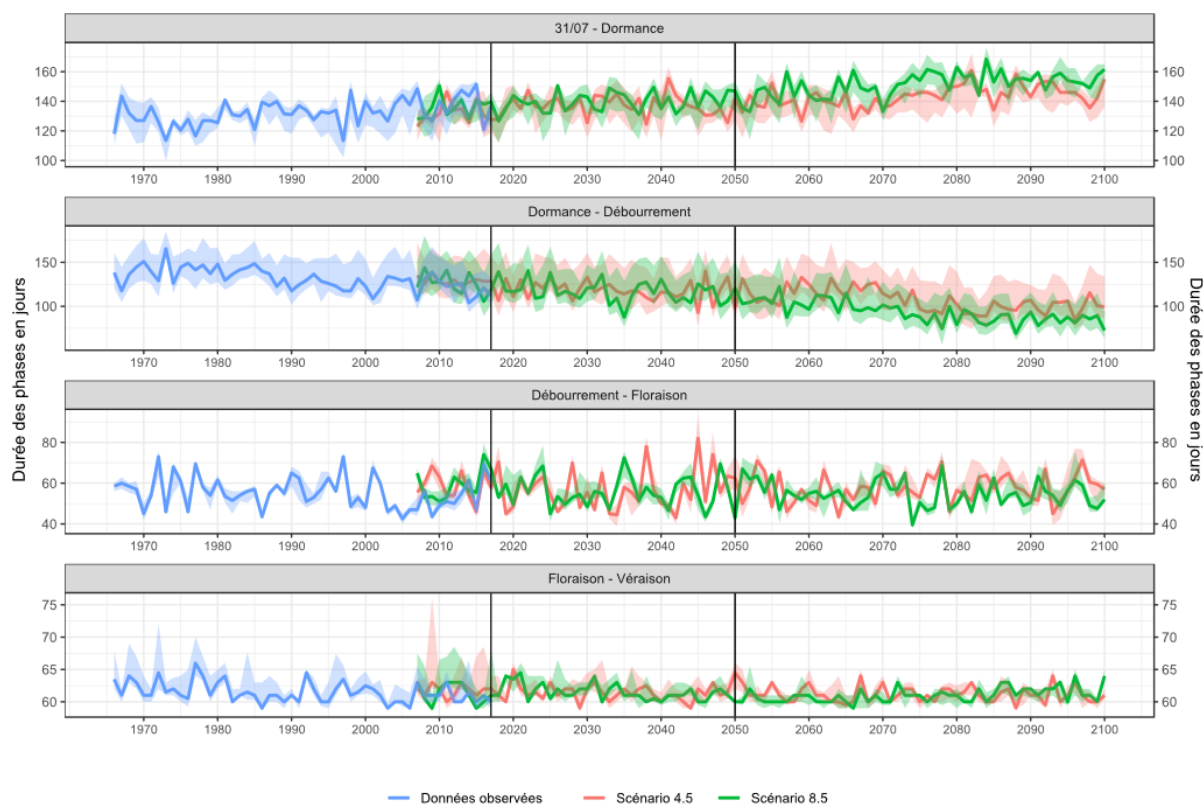


Figure 33. Evolution de la durée de différentes phases phénologiques pour le cépage Syrah dans le vignoble du Ventoux. Le trait bleu représente les valeurs obtenues à partir des données observées (voir chapitre 4). Les traits rouge et vert représentent respectivement les résultats des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM). Enfin, les bandes des mêmes couleurs représentent la variabilité calculée entre le 1^{er} et le 9^{ème} décile pour l'ensemble de mailles.

5.2 *Etudes des indicateurs écoclimatiques*

Dans cette section nous allons étudier l'évolution des différentes variables climatiques selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 calculés à partir du modèle CNRM. Pour cela nous allons aussi utiliser des indicateurs écoclimatiques qui seront calculés pendant les principales phases phénologiques, mais dans certains cas, autour des stades phénologiques importantes. Alors que l'analyse a été réalisée sur un nombre importants d'indicateurs prenant en compte toutes les variables climatiques disponibles (voir tableau Annexe 1), nous avons observé des évolutions significatives que pour la plupart des variables concernant la température, et en moindre mesure la pluviométrie (rien pour le rayonnement, vent et humidité relative).

5.2.1 **Evolution des indicateurs de température**

Dans cette section nous allons explorer les résultats obtenus pour les indicateurs concernant la température : température minimales, moyennes et maximales, amplitude thermique et fréquence et nombre de jours avec une température supérieure à 30°C. Les valeurs de ces indicateurs ont été calculées pour les trois principales phases : débourrement-floraison, floraison-véraison et véraison-vendange. La valeur de 30°C a été choisie, car c'est la valeur à partir de laquelle la vigne rentre dans la phase supra-optimale du développement et de la croissance. Elle nous permet de caractériser à partir de quand la plante commence à se sentir en stress thermique. Par ailleurs, l'intérêt de calculer la fréquence et le nombre de jours pour une même variable, ici les jours avec une température supérieure à 30°C, est de nous permettre d'évaluer l'impact de ce changement dans une période donnée. Autrement dit, si l'on obtient 10 jours chauds, cela peut sembler beaucoup, mais si la phase dure 60 jours, finalement l'impact peut être réduit (sauf s'ils sont tous consécutifs, dont on pourrait imaginer un effet important sur la croissance). Par contre, si l'on a environ 80% de jours d'une période qui sont des jours chauds, on peut conclure que la période sera très chaude.

- Evolution de la température sur l'ensemble des phases/stades

La Figure 34 montre l'évolution au cours du siècle des températures minimales, moyennes et maximales pendant les trois principales phases du développement de la vigne. Les calculs sont faits à partir des données historiques (jusqu'à 2017) et avec les données des scénarios RCP 4.5 et 8.5 du modèle CNRM jusqu'à la fin du siècle. Comme l'on peut observer il existe un certain décalage entre les températures minimales observées et simulées, notamment pour les phases se situant en fin d'hiver et le printemps. Le biais observé entre les données simulées et les données observées dans la Figure 34 pourrait montrer potentiellement un réchauffement encore plus fort que celui initialement prévu. Ainsi, si l'on corrige les valeurs simulées en prenant en compte le biais, l'augmentation de la température serait encore plus significative notamment pour la phase floraison-véraison.

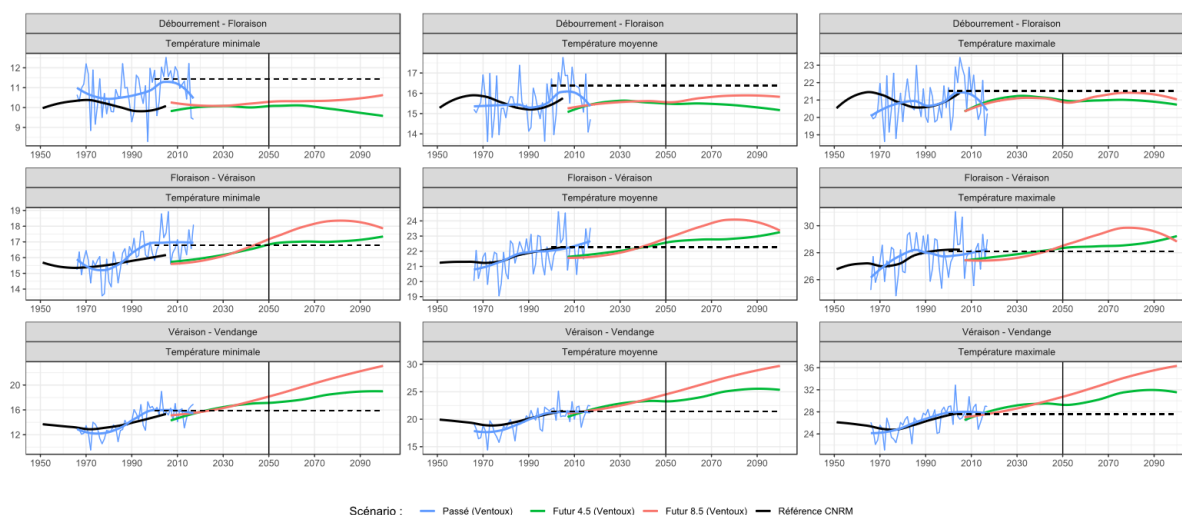


Figure 34. Evolution de la moyenne mobile pour les trois températures (minimale, moyenne et maximale) pour les données historiques (bleu) et les données simulées de référence (noir) et les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (vert et rouge respectivement - modèle CNRM) pour les trois phases de développement de la vigne.

Afin d'explorer davantage d'indicateurs, nous allons décliner par la suite la même analyse en se focalisant sur les trois phases phénologiques et en regardant leur évolution (des indicateurs) sur trois périodes temporelles moyenne (et non en dynamique comme montré dans la Figure 34).

- Débournement – Floraison

La Figure 35 montre l'évolution des différents indicateurs de température pour la phase « débournement-floraison ». On peut remarquer que l'évolution des températures ne montre pas de changement majeur. D'une manière générale on observe une stabilisation des températures vécues pendant cette période et cela indépendamment du scénario climatique retenu. Le seul changement qui peut être souligné est une légère augmentation de la variabilité (éloignement du premier et du neuvième déciles).

On peut remarquer que dans la liste d'indicateurs qui ont émergé à cette période n'apparaissent pas les indicateurs indiquant un risque de gel. En effet, malgré une diminution annoncée du nombre de jours froids et de leur tardivité (plus ou moins importante selon le scénario), celle-ci va s'accompagner d'un avancement du débournement qui va maintenir le risque de gel dans la région.

Enfin, si l'on tient compte du biais observé dans la Figure 34, on observe que les tendances à la diminution des températures n'aurait finalement pas lieu, mais plutôt une stabilisation des températures (comme discuté plus haut).

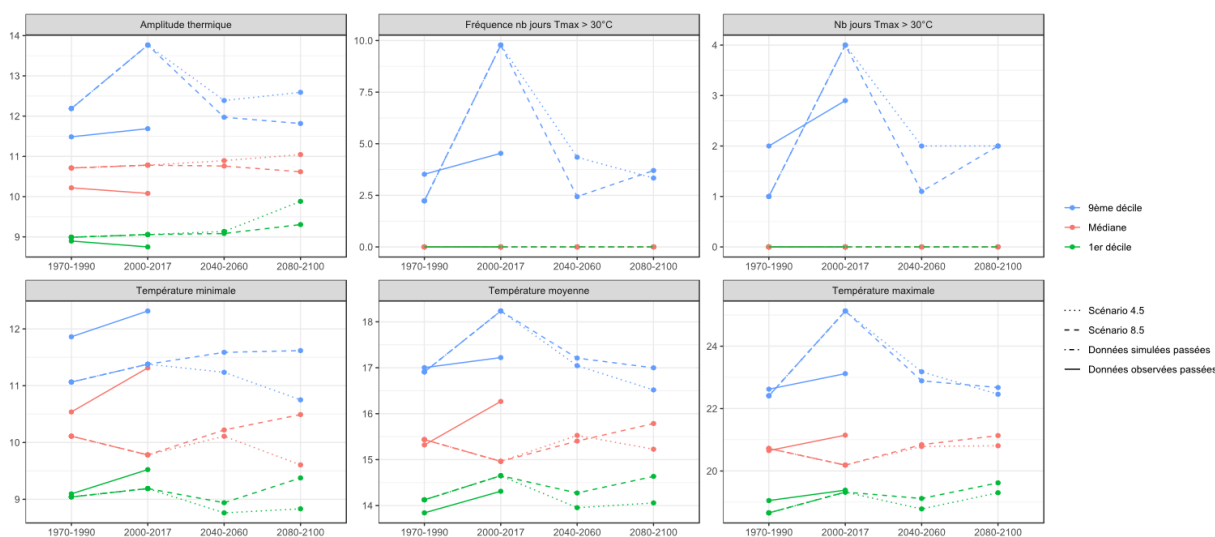


Figure 35. Evolution de la médiane et des 1^{er} et 9^{ème} décile des différents indicateurs calculées pour la phase « **débournement – floraison** ». Les valeurs sont calculées sur 4 périodes de 20 ans (1970-1990, 2000-2017*, 2040-2060, 2080-2100) pour les données historiques (trait continue) et pour les données de référence et futures des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM). *Pour les données simulées de la période de référence les deux périodes ont été séparés de la manière suivante : 1970-2000 et 2000-2005.

- Floraison – Véraison

Contrairement à la phase « débournement-floraison », nous observons une évolution très forte et significative des températures dans la phase « floraison – véraison » (Figure 36). Ces tendances sont les mêmes indépendamment des scénarios (mais non leur intensité). Alors que l'on observe une très légère augmentation à l'horizon 2050, celle-ci s'accroît vers la fin du siècle (notamment pour le scénario RCP 8.5). Le scénario RCP 4.5 montre des évolutions assez différentes plus les trois températures. Alors que la température maximale suit une tendance semblable mais un peu moins forte que celle du scénario RCP 8.5, la température minimale reste stabilisée autour des valeurs actuelles. La température moyenne suit une légère augmentation due à la compensation des deux autres températures. Dans le cas du scénario RCP 8.5, la tendance montre une augmentation constante et très significative jusqu'à la fin du siècle.

Les autres indicateurs suivent des changements importants. Alors que l'amplitude thermique montre une augmentation de sa variabilité annuelle (et locale), le nombre de jours chauds (température maximale supérieure à 30 C) augmente très fortement dans les deux scénarios (jusqu'à environ +40% de jours chauds pendant la phase). Seulement le scénario RCP 8.5 montre une forte augmentation du 1^{er} décile (donc une généralisation des jours chauds pendant la phase), alors que le scénario RCP 4.5 montre aussi une augmentation de sa variabilité (la distance entre le 1^{er} et le 9^{ème} décile augmente). L'augmentation de ces températures peut commencer à affecter le feuillage et la compétition avec les fruits. En effet, ces fortes températures, peuvent augmenter considérablement l'évapotranspiration du système et il sera nécessaire de maintenir dans ces conditions un certain confort hydrique via un équilibrage de la végétation, une gestion du rapport feuille/fruit, voir via un complément d'eau via l'irrigation quand cela s'avère nécessaire et pertinent.

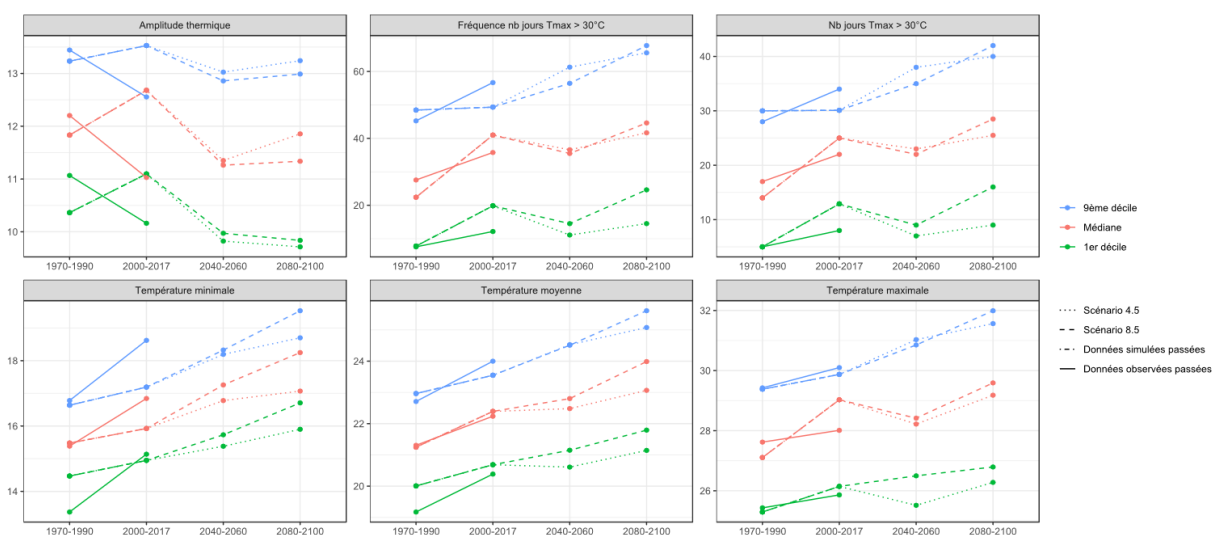


Figure 36. Evolution de la médiane et des 1^{er} et 9^{ème} décile des différents indicateurs de température calculées pour la phase « **floraison-véraison** ». Les valeurs sont calculées sur 4 périodes de 20 ans (1970-1990, 2000-2017*, 2040-2060, 2080-2100) pour les données historiques (trait continue) et pour les données de référence et futures des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM). *Pour les données simulées de la période de référence les deux périodes ont été séparés de la manière suivante : 1970-2000 et 2000-2005.

- Véraison – Vendange

La période « véraison-vendange » est celle qui est la plus affectée par l’augmentation des températures et le déplacement des phases phénologiques vers les périodes les plus chaudes de l’été. Cela se traduit par une augmentation très forte des températures, notamment dans le scénario RCP 8.5. Par ailleurs, dans ce scénario on observe aussi une diminution de la variabilité (la distance entre déciles se resserre), ce qui traduit une certaine constance dans les fortes températures (indépendamment de l’année) mais aussi une certaine homogénéisation des conditions entre tous les sites du Ventoux : les secteurs chauds resteront chauds et les secteurs froids se réchaufferont beaucoup. Si l’on regarde la Figure 37 les augmentations pourraient varier entre + 7°C (dans le scénario RCP 4.5) et +10°C (dans le scénario RCP 8.5).

Si l’on s’intéresse aux autres indicateurs on observe que l’amplitude va aussi augmenter indépendamment du scénario. Enfin, le nombre de jours chauds (température maximale supérieur à 30°C) va suivre aussi une augmentation très importante dans les deux scénarios étudiés. Dans le scénario RCP 8.5 pratiquement 100% des jours seront chauds (le premier décile augmente très fortement), alors que dans le scénario RCP 4.5 on observe une très forte variabilité selon les années et les sites (très forte divergence entre le 1^{er} et le 9^{ème} décile).

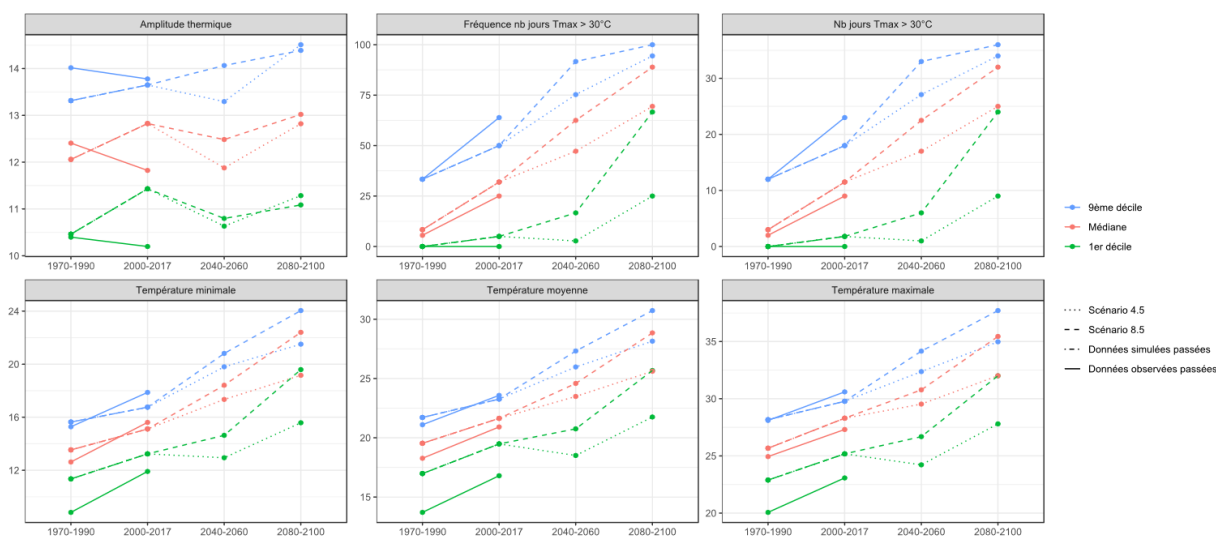


Figure 37. Evolution de la médiane et des 1^{er} et 9^{ème} décile des différents indicateurs calculées pour la phase « **véraison - vendanges** ». Les valeurs sont calculées sur 4 périodes de 20 ans (1970-1990, 2000-2017*, 2040-2060, 2080-2100) pour les données historiques (trait continue) et pour les données de référence et futures des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM). *Pour les données simulées de la période de référence les deux périodes ont été séparés de la manière suivante : 1970-2000 et 2000-2005.

5.2.2 Evolution de la somme des précipitations

Nous avons évalué l'évolution du cumul de précipitation (en mm) pendant les principales phases phénologiques et autour de chaque stade phénologique (valeur calculée en prenant en compte la période comprenant les 10 jours avant et après chaque stade phénologique). Les valeurs de cet indicateur peuvent varier beaucoup selon les phases étudiées car elles sont plus ou moins longues. Comme pour les calculs réalisés concernant les températures, nous avons pris en compte deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5) du modèle CNRM et nous avons évalué l'évolution de l'indicateur en prenant en compte les mêmes quatre périodes. Les principaux résultats obtenus sont montrés dans la Figure 38:

- On observe une importante diminution de la pluviométrie pendant les phases hivernales (dormance et post dormance). Celle-ci est accompagnée d'une diminution de la variabilité. Cela peut avoir un impact non négligeable concernant la recharge des nappes, mais aussi concernant l'état hydrique du sol au moment du démarrage de la végétation.
- Pendant la phase débourrement-floraison, on observe une certaine stabilité. Ceci permettrait de maintenir des conditions favorables à la mise en place de la végétation, si l'on n'est pas déjà à ce moment dans des conditions de stress hydrique (si finalement la phase précédente a été sèche comme nous avons décrit ci-dessus).
- Par contre, on observe une légère augmentation de la pluie à la floraison, laquelle est aussi accompagnée d'une augmentation de sa variabilité. Ces conditions indiquent que le risque des conditions défavorables au moment de la fécondation des fleurs n'est pas négligeable, l'augmentation de la pluviométrie étant accompagnée d'une diminution du rayonnement (deux facteurs qui jouent un rôle important dans le déclenchement de la coulure).
- L'évolution de la pluviométrie au moment de la phase de remplissage des baies (floraison-véraison) montre une certaine augmentation/stabilisation. Cela pourrait avoir un effet favorable sur la mise en place du rendement, sauf si les conditions hydriques précédentes sont défavorables.

- Enfin, on observe une très forte diminution de la pluviométrie à partir de la véraison et jusqu'à la récolte, laquelle est accompagnée d'une très forte diminution de la variabilité (des conditions sèches généralisés).

L'analyse de tous ces résultats montre que la gestion globale du système reste très complexe et variable selon les périodes et les années. Il est assez probable que des années extrêmes (forte ou faible pluviométrie) puissent avoir lieu à l'avenir. Mais c'est aussi possible d'avoir des années avec des périodes très contrastées, c'est qui peut complexifier d'avantage le pilotage et la prise de décision concernant la gestion et l'utilisation de l'eau. Enfin, les fortes températures attendues pendant la maturation, si elles sont accompagnées par des conditions hydriques très (trop) limitantes auront aussi un impact certain sur le rendement et la qualité.

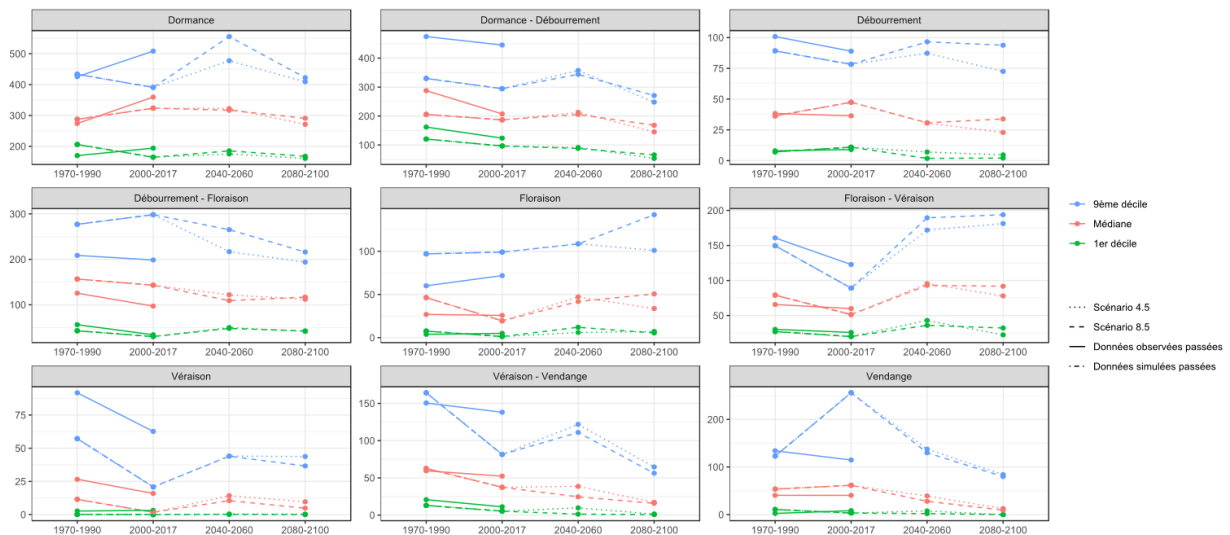


Figure 38. Evolution de la médiane et des 1^{er} et 9^{ième} décile du cumul de pluviométrie (mm) calculé pour les différents stades et phases phénologiques. Les valeurs concernant les stades phénologiques (dormance, débourrement, floraison, véraison et vendange ont été calculés en prenant en compte les 10 jours avant et après chaque stade. Les valeurs sont calculées sur 4 périodes de 20 ans (1970-1990, 2000-2017*, 2040-2060, 2080-2100) pour les données historiques (trait continue) et pour les données de référence et futures des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM). *Pour les données simulées de la période de référence les deux périodes ont été séparés de la manière suivante : 1970-2000 et 2000-2005.

5.2.3 Evolution du déficit hydrique

Le déficit hydrique est calculé en soustrayant de la pluviométrie l'évapotranspiration potentielle de la vigne. Un déficit hydrique important va affecter fortement la croissance végétative entraînant un ralentissement de sa croissance.



Figure 39. Evolution de la moyenne mobile du déficit hydrique pour les données historiques (bleu) et les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM) pour les trois phases de développement de la vigne.

Si l'on regarde la Figure 39, on n'observe pas de réelle tendance pour les deux premières phases indépendamment du scénario. Malgré le biais existant entre les séries pour la première phase, on n'observe pas d'évolution si l'on corrige la différence (comme décrit plus haut avec les températures). Une légère tendance à l'augmentation est observée au cours de la période floraison et véraison, indépendamment du scénario. Seul le scénario RCP 8.5 enregistre une augmentation significative du déficit hydrique pendant la phase de maturation. Dans le scénario RCP4.5 le déficit continue à augmenter pour se stabiliser par la suite.

Une analyse des conditions hydriques autour des stades (Tableau 12) montre qu'à partir de la floraison et jusqu'à la maturité il pourrait y avoir un déficit hydrique plus important dans le cas du scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100. La répartition spatiale de ce déficit hydrique serait assez homogène avec des valeurs variant entre -60mm et jusqu'à moins de 100mm dans certains cas (notamment au moment de la véraison). Comme nous l'avons déjà mentionné plus tôt, la variabilité de ces situations sera un point important à prendre en compte dans la gestion du vignoble et notamment au cours de la maturation.

Tableau 12. Evolution du déficit hydrique (en mm) dans les différents secteurs selon le scénario RCP 8.5 du modèle CNRM calculé autour des stades phénologiques. Les valeurs représentées sont seulement ceux qui ont changé de façon significative à l'horizon 2100.

	Floraison	Véraison	Vendange
Apt	-25.5	-69.7	-73.4
Bédoin		-69.8	-65.4
Cabrières-d'Avignon		-57.7	-64.0
Caromb	-32.9	-61.8	-61.1
Carpentras		-60.5	-55.7
L'Isle-sur-la-Sorgue		-56.8	-51.3
La Roque-sur-Pernes		-61.0	-63.4
Malaucène	-48.3	-103.7	-63.8
Malemort-du-Comtat	-26.7	-76.4	-56.2
Murs	-37.3	-113.4	
Roussillon		-55.0	-69.9
Saint-Saturnin-lès-Apt	-58.3	-118.7	-60.4
Suzette		-76.1	-63.5
Vaison-la-Romaine	-31.1	-83.2	-67.4
Venasque	-25.2	-96.9	
Villes-sur-Auzon	-47.2	-104.8	-58.7

5.3 Une extension du territoire du Ventoux : le cas de Monieux

Enfin, dans le cas de cette étude, nous avons aussi voulu explorer l'évolution spatiale de ce territoire. Pour cela, nous avons décidé de tester l'hypothèse suivante : *Dans un futur proche sera-t-il possible d'envisager la présence de vignoble en haute altitude ?*

Pour cela, nous avons pris comme exemple deux zones définies par le village de Monieux et une partie de Sault, situées à plus de 850 mètres d'altitude (841 mètres pour Monieux nord et 866 mètres pour Monieux sud).

Afin de répondre à cette question, nous allons comparer les températures moyennes qu'a pu connaître la zone du Ventoux dans le passé, à ce que va connaître Monieux et ses alentours dans un futur proche et lointain selon différents scénarios climatiques. La Figure 40 montre les tendances des différentes variables pour le vignoble du Ventoux et les secteurs de Monieux sud et nord. Bien que les températures soient sensiblement les mêmes en période de printemps (débourrement-floraison), et sans prendre en compte le risque de gel, il faut attendre les années 2050 avec le scénario RCP 8.5 pour voir une similitude avec les températures des années 1970 ou actuelles (selon la phase). Avec le scénario RCP 4.5 on arrive à atteindre les conditions climatiques actuelles du Ventoux à la fin du siècle. Cette information est à prendre avec précaution, car d'autres facteurs limitants (eau, gel, disponibilité du sol) pourraient limiter la possibilité de planter de la vigne dans ce secteur. Enfin, il est préférable de ne pas arriver à vérifier cette hypothèse car cela voudrait dire que les conditions climatiques dans les autres secteurs seront devenues très difficiles, non seulement pour la culture de la vigne, mais aussi pour la société dans son ensemble.

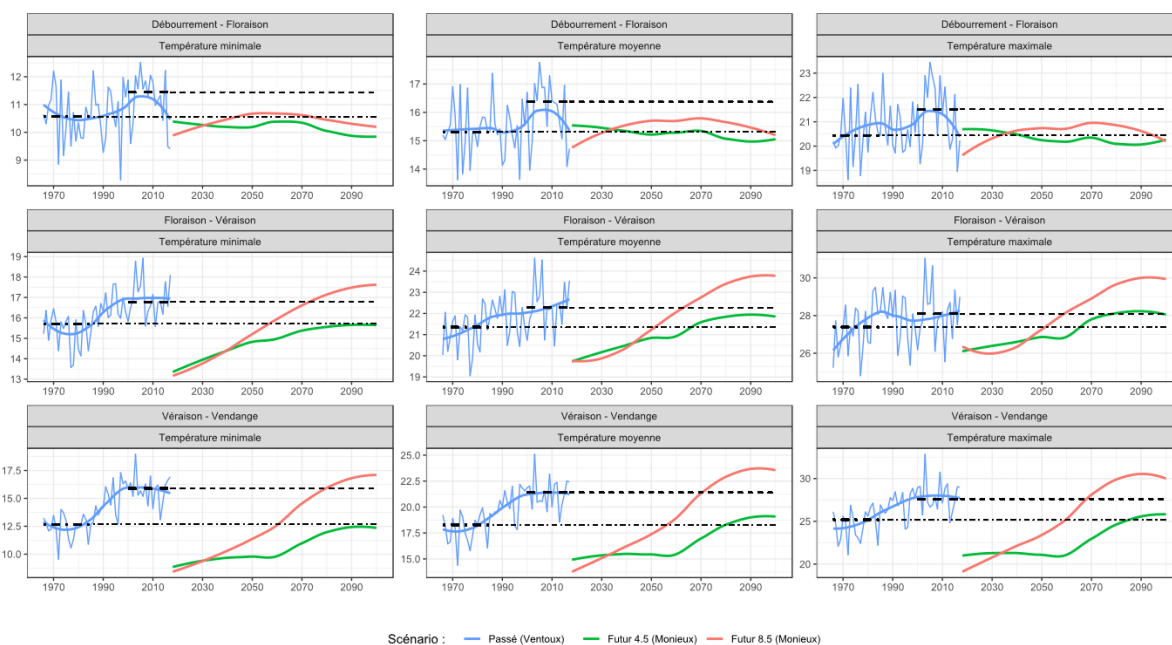


Figure 40. Evolution de la médiane et des 1^{er} et 9^{ème} décile des trois températures (minimales, moyenne et maximale) calculées pour les trois phases de développement. La courbe bleue représente l'évolution actuelle des températures dans le vignoble du Ventoux (médiane de tous les secteurs). Les lignes pointillées et avec traits représentent respectivement la valeur médiane des années 1966-1986 et 1990 – 2017. Les lignes rouge et verte représentent l'évolution de la valeur moyenne des températures de Monieux selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM).

Les points importants

- Les scénarios et les horizons temporelles vont avoir des conséquences très diverses.
- La phénologie va continuer à avancer d'environ deux semaines dans la plupart des secteurs jusqu'à l'année 2050. Dans le scénario RCP 4.5 cette situation se stabilisera jusqu'à la fin du siècle.
- Dans le scénario RCP 8.5 cette évolution sera beaucoup plus importante à l'horizon 2100 avec une avancée attendue de plus d'un mois notamment pour les stades estivaux (véraison et vendanges).
- Les conditions climatiques hivernales vont modifier les interactions entre les phases de post-dormance et dormance. Par contre la durée des phases végétatives ne semble pas être modifiée.
- La variabilité interne du vignoble va continuer à diminuer.
- La modification de la phénologie va générer des modifications importantes des conditions climatiques de la croissance et de la maturation, parfois accompagnés d'une augmentation de leur variabilité.
- Les changements les plus importants seront observés pendant la croissance du raisin (floraison - vendange) avec une forte augmentation des températures du jour et de nuit.
- Le risque de gel ne peut pas être écarté à l'avenir.
- Les conditions hydriques vont continuer à se dégrader mais il reste encore beaucoup d'incertitudes en ce qui concerne la pluviométrie.
- Il n'y a pas de tendance significative en ce qui concerne les autres variables climatiques (rayonnement, vent, humidité relative).

6 Conclusions

Le changement climatique a déjà affecté et modifié les conditions climatiques du vignoble du Ventoux. Au cours de ces dernières 50 années, cette région a vécu une avancée importante et significative du point de vue statistique de sa phénologie. Cette évolution a été plus ou moins importante selon les secteurs et générée une tendance vers une plus grande homogénéisation du vignoble. Les changements observés ont eu déjà comme conséquence un déplacement de la phase de maturation du raisin vers des périodes beaucoup plus chaudes. Ceci a généré déjà une augmentation de la température pendant cette période qui équivaut parfois à plus de deux fois le réchauffement annuel observé. Par rapport aux autres vignobles vaclusien le vignoble du Ventoux a montré une tendance à se rapprocher des autres secteurs en ce qui concerne les températures maximales en été, toute en gardant une amplitude thermique plus importante, surtout due aux températures plus fraîches pendant la nuit (températures minimales). Ces écarts de température sont importants car ils permettent d'atténuer les effets des fortes températures pendant la journée. La contrainte hydrique a commencé à évoluer et elle commence à être de plus en plus importante en fin de cycle. Enfin, les autres variables climatiques qui ont été étudiées n'ont pas montré de tendance significative.

La tendance future d'évolution du vignoble dépendra fortement du scénario d'évolution d'émissions à gaz à effet de serre. Dans tous les cas, nous savons aujourd'hui que l'avancement de la phénologie et l'augmentation de la température va continuer inexorablement jusqu'à l'année 2050. Nos connaissances actuelles nous permettront de s'adapter à ces changements si l'on commence à travailler dès maintenant. Cependant, au-delà de cette date et si la tendance aux émissions n'est pas inversée dans les 5 années à venir l'évolution du climat sera telle que notre capacité d'adaptation dans certains secteurs deviendra de plus en plus limitée, voire nulle.

Cette étude a permis de quantifier l'évolution (passée, récente et future) de certaines variables climatiques. Ces données, permettent d'avoir un aperçu générale d'évolution climatique d'un territoire qui intègre une importante variabilité climatique. Ces données et tendances doivent nous aider à mieux comprendre notre environnement, sa complexité, ses évolutions et ainsi mieux construire des stratégies d'adaptation qui tiennent compte de cette richesse de situations.

La température apparait comme LE facteur clé qui va changer à l'avenir. L'eau reste un facteur limitant important, mais dont sa tendance est plus incertaine. Néanmoins, l'interaction entre les précipitations et les températures va se traduire par une hausse de l'évapotranspiration, laquelle risque d'accroître les situations à déficit hydrique. Ces tendances peuvent être plus ou moins amplifiées selon le type de sol (superficiel ou profond), l'exposition et le type de système que l'on pratique. Dans ce cadre, plusieurs questions émergent qui permettraient de définir plusieurs voies d'adaptation complémentaires :

- Est-il possible d'évaluer la résistance à la sécheresse et aux fortes températures des cépages déjà cultivés ? Qui supporte mieux les fortes températures ? qui limite l'augmentation du degré alcoolique et la rapide dégradation de l'acidité ?
- Quel est la pertinence et la viabilité des systèmes de conduite actuels (palissage, gobelet) face à ces contraintes. Y-a-t'il des systèmes plus résilient que d'autres ? Existe-t'il déjà un retour d'expérience local sur la question ?
- Quels sont potentiellement les terroirs du vignoble actuel qui permettront de limiter ces évolutions ? Y-a-t'il des nouveaux terroirs potentiellement favorables et non exploités actuellement ?

- Comment améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau ? Comment assurer une viticulture sans eau quand l'irrigation ne peut pas être envisagée ?
- Comment accompagner une évolution du vignoble, où toutes les viticultures qui existent actuellement, familiale, négoce, coopérative, puissent encore coexister à l'avenir ?

Toutes ces questions et d'autres qui pourront émerger à la lecture de ce rapport sont des enjeux forts auxquels la viticulture devra faire face demain.

Comme nous l'avons montré dans le cadre du projet LACCAVE il n'existe pas de solution unique et universelle pour s'adapter à ces changements. Les solutions pouvant être mises en pratique seront le résultat de la combinaison de plusieurs innovations techniques, associées à plusieurs stratégies spatiales et à des changements institutionnels. L'intégration de ces solutions doit également prendre en compte l'ensemble de la chaîne de valeur, y compris l'évolution des préférences des consommateurs, qui sont essentielles pour l'évaluation et la commercialisation du vin. Ainsi, les stratégies d'adaptation doivent être coordonnées aux niveaux local et régional, car les impacts sur le climat sont spécifiques, ce qui permet également d'optimiser les ressources disponibles. Néanmoins, nous avons encore des questions sur l'efficacité de certaines pratiques (*e.g.* comme celles citées plus haut) face au changement climatique. En ce sens, la capacité de collaboration et innovation entre chercheurs et professionnels du secteur sera un facteur clé pour réussir l'adaptation.

7 Littérature

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome 300, D05109.

Bador, M., Terray, L., Boé, J., Somot, S., Alias, A., Gibelin, A.-L., Dubuisson, B., 2017. Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. *Environmental Research Letters* 12, 074025.

Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201–212.

Caubel, J., García de Cortázar-Atauri, I., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., Graux, A.-I., 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. *Agricultural and Forest Meteorology* 207, 94–106.

Caubel, J., García de Cortázar-Atauri, I., Vivant, A., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., 2018. Assessing future meteorological stresses for grain maize in France. *Agricultural Systems* 159, 237–247.

Dura, A., 2018. Impact du changement climatique sur les rendements viticoles en vallée du Rhône. Mémoire du Master 2 DA PISTv. AgroParisTech. 45pp.

García de Cortázar-Atauri, I., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Agroclim-INRA, Montpellier: Ecole Supérieur Nationale d'Agronomie de Montpellier.

García de Cortázar-Atauri, I., Brisson, N., Gaudillere, J.P., 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology* 53, 317–326.

García de Cortázar-Atauri, I., Daux, V., Garnier, E., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Boursiquot, J.M., Parker, A.K., Van Leeuwen, C., Chuine, I., 2010. Climate reconstructions from grape harvest dates: methodology and uncertainties. *The Holocene* 20, 599–608.

García de Cortázar-Atauri, I., Duchêne, E., Destrac-Irvine, A., Barbeau, G., Rességuier, L. de, Lacombe, T., Parker, A.K., Saurin, N., Leeuwen, C. van, 2017. Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One* 51, 115–126. <https://doi.org/10.20870/oenone.2016.0.0.1622>

Gibelin, A.-L., Dubuisson, B., Corre, L., Deaux, N., Jourdain, S., Laval, L., Piquemal, J.-M., Mestre, O., Denetière, D., Desmidt, S., 2014. Evolution de la température en France depuis les années 1950: Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence. Rubrique: Climatologie.

Holzkämper, A., Calanca, P., Fuhrer, J., 2013. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and forest meteorology* 168, 149–159.

Holzkämper, A., Calanca, P., Fuhrer, J., 2011. Analyzing climate effects on agriculture in time and space. *Procedia Environmental Sciences* 3, 58–62.

IPCC - Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., 2013. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of

- Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535 pp. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, and New York.
- Jouzel J., Petit M., Masson-Delmotte V., 2018. Trente ans d'histoire du Giec. Rubrique: Histoire.
- Lhotellier R., 2005. Spatialisation des températures en zone de montagne alpine. Géographie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2005. Français. 353 pp
- Luu, L.N., Vautard, R., Yiou, P., Oldenborgh, G.J. van, Lenderink, G., 2018. Attribution of Extreme Rainfall Events in the South of France Using EURO-CORDEX Simulations. Geophysical Research Letters 45, 6242–6250. <https://doi.org/10.1029/2018GL077807>
- Menzel, A., 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. International journal of biometeorology 44, 76–81.
- Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Züst, A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology 12, 1969–1976.
- Moisselin, J.-M., Dubuisson, B., 2006. Évolution des valeurs extrêmes de température et de précipitations au cours du XXe siècle en France.
- Parker, A., García de Cortázar-Atauri, I., Chuine, I., Barbeau, G., Bois, B., Boursiquot, J.-M., Cahurel, J.-Y., Claverie, M., Dufourcq, T., Gény, L., others, 2013. Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: A case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L. Agricultural and Forest Meteorology 180, 249–264.
- Parker, A.K., García de Cortázar-Atauri, I., Van Leeuwen, C., Chuine, I., 2011. A general phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera* L. Australian Journal of Grape and Wine Research. Planton et al., 2015
- 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, 226–242.
- Toyoda, T., 1974. Use of the Chow test under heteroscedasticity. Econometrica (pre-1986) 42, 601.

8 Lexique

Agroécosystème. Aussi appelé dans certaines situations agrosystème, il décrit un écosystème modifié par l'Homme afin d'exploiter une part de la matière organique (biomasse, récolte) qu'il produit, généralement à des fins alimentaires.

Hétéroscédasticité. Condition statistique qui définit que la variance des erreurs stochastiques de la régression est différente pour chaque observation.

Homoscédasticité. Condition statistique qui définit que la variance des erreurs stochastiques de la régression est la même pour chaque observation.

Médiane. Valeur qui permet de séparer l'échantillon en deux en représentant 50% des individus de chaque côté.

Phénologie. La phénologie est l'étude des rythmes saisonniers des organismes vivants qui sont déterminés par les variations saisonnières du climat. Cela correspond à la floraison, les migrations, les éclosions, les débourrements, la chute de feuilles...

Quantile. Les quantiles sont les valeurs qui divisent un jeu de données en intervalles contenant le même nombre de données.

Rapport du GIEC. LE GIEC a produit à ce jour a produit cinq rapports scientifiques sur les questions suivantes: évolution du climat, mesures d'adaptation et d'atténuation et une synthèse pour les décideurs. Le dernier rapport, le AR5, a été publié en 2014 (<https://www.ipcc.ch/report/ar5/>) et le prochain (AR6) sera publié en 2022. Pour plus d'information voir Jouzel et al., (2018).

Representative Concentration Pathway. Ces scénarios sont ceux utilisés par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour définir la trajectoire de forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300 dans le rapport de 2013. Voir section 2.1.2 pour plus d'information.

Vin tranquille. Cela correspond à un vin qui ne forme pas de bulles à l'ouverture, car il n'a pas fait une fermentation carbonique. C'est le contraire d'un vin effervescent.

Annexes

Dans ces annexes nous allons décrire certains résultats qui n'ont pas été introduits dans le document finale.

Annexe 1

Liste d'indicateurs calculés.

	Variable climatique	Description courte	Description complète
Température	Température minimale	Température minimale	Température moyenne minimale pour chaque phase de développement
		Nb jours Tmin < 1.5°C	Nombre de jours où Tmin < 1.5°C
		Fréquence nb jours Tmin < 1.5°C	Fréquence (%) de jours où Tmin < 1.5°C
		Nb jours Tmin < 0°C	Nombre de jours où Tmin < 0°C
		Fréquence nb jours Tmin < 0°C	Fréquence (%) de jours où Tmin < 0°C
		Nb jours Tmin < -2°C	Nombre de jours où Tmean < -2°C
		Fréquence nb jours Tmin < -2°C	Fréquence (%) de jours où Tmin < -2°C
		Premier jour de gel	1er jour de gel au cours du cycle cultural (Température minimale < 0°C)
		Dernier jour de gel	Dernier jour de gel au cours du cycle cultural (Température minimale < 0°C)
		Durée de la période de gel	Durée de la période de gel (Température minimale < 0°C)
	Température moyenne	Température moyenne	Température moyenne pour chaque phase de développement (°C)
		Nb jours Tmean < 5°C	Nombre de jours où Tmean < 5°C
		Fréquence nb jours Tmoy < 5°C	Fréquence (%) de jours où Tmoy < 5°C
	Température maximale	Température maximale	Température moyenne maximale pour chaque phase de développement
		Nb jours Tmax > 30°C	Nombre de jours où Tmax > 30°C (calculé pour chaque phase mais plutôt regardé entre floraison et récolte car échaudage)
		Fréquence nb jours Tmax > 30°C	Fréquence (%) de jours où Tmax est > 30°C (calculé pour chaque phase mais plutôt regardé entre floraison et récolte car échaudage)
Température minimale et maximale	Amplitude thermique	Amplitude thermique journalière moyenne pour chaque phase de développement (°C)	
Ensoleillement	Rayonnement	Rayonnement moyen	Rayonnement moyen (joule/cm ²) pour chaque phase de développement
		Somme des radiations	Rayonnement cumulé (joule/cm ²) pour chaque phase de développement
Vent	Vent	Nb jours vent > 15 km/h	Nombre de jours avec une vitesse de vent supérieure à 15 km/h pour chaque phase de développement
		Fréquence nb jours vent > 15 km/h	Fréquence (%) de jours avec une vitesse de vent supérieure à 15 km/h pour chaque phase de développement
Précipitation	Pluie	Somme des précipitations	Cumul de pluie (mm) pour chaque phase de développement
		Nb jours de pluie	Nombre de jours de pluie pour chaque phase de développement
		Fréquence nb jours de pluie	Fréquence (%) de jours de pluie pour chaque phase de développement
		Nb jours pluie > 20 mm	Nombre de jours de forte pluie (pour lesquels il a plu plus de 20 mm) pour chaque phase de développement
		Fréquence nb jours pluie > 20 mm	Fréquence (%) de jours de forte pluie (pour lesquels il a plu plus de 20 mm) pour chaque phase de développement
Sècheresse	Températures, Pluie, Evapotranspiration, Vent	Déficit hydrique	Déficit hydrique: pluviométrie moins l'évapotranspiration de référence
		Nb jours avec SWC < seuil modéré	Nombre de jours avec teneur en eau du sol < seuil modéré
		Fréquence nb jours avec SWC < seuil modéré	Fréquence de jours avec teneur en eau du sol < seuil modéré
		Nb jours SWC < seuil sévère	Nombre de jours avec teneur en eau du sol < seuil sévère
		Fréquence nb jours SWC < seuil sévère	Fréquence de jours avec teneur en eau du sol < seuil sévère

Annexe 2

Stade des vendanges

Contrairement aux autres stades, le stade des vendanges n'est pas calculé à partir d'une somme de température journalière mais par rapport à la véraison à laquelle on ajoute 35 jours qui représentent la période de maturation du raisin. Les résultats obtenus ci-dessous correspondent donc aux mêmes résultats que pour la véraison mais en décalant les dates d'apparition du stade.

Comme pour les autres stades, nous avons:

- Représenté l'évolution de la date d'apparition du stade des vendanges par territoires du Ventoux (Figure A1).
- Calculé le nombre de jours d'avancement significatif du stade des vendanges depuis 1966 (Tableau A1). Dans les secteurs les plus précoces (Carpentras et Caromb) l'avancée de la vendange est d'environ deux semaines, alors que dans les secteurs au Nord du territoire l'avancée est de presque 1 mois (Suzette et Vaison la Romaine).
- La répartition géographique de cette avancement (figure A2).
- Les dates de rupture des évolutions des dates de vendange (figure A3).

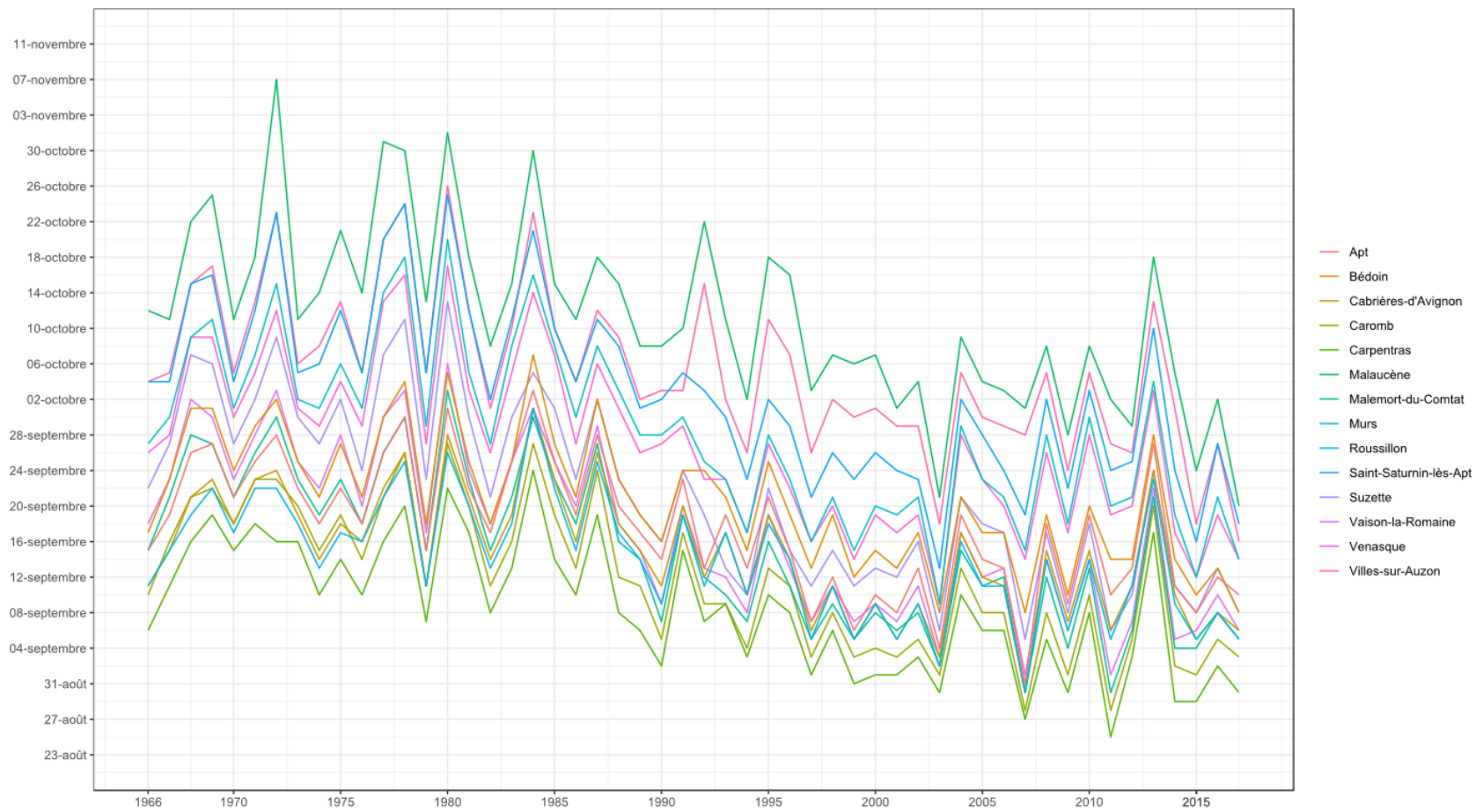


Fig. A1. Evolution de la date de vendange dans les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Cette date est calculée à partir de la date de véraison en ajoutant 35 jours.

Tableau A1.- Nombre de jours d'avancement significatif du stade des vendanges depuis 1966.

1966-2017	Vendange
Village	Avancement en nombre de jours
Apt	-15.2
Bédoin	-16.5
Cabrières-d'Avignon	-13.9
Caromb	-19.6
Carpentras	-17.0
Malaucène	-23.6
Malemort-du-Comtat	-22.6
Murs	-22.4
Roussillon	-13.4
Saint-Saturnin-lès-Apt	-23.3
Suzette	-26.5
Vaison-la-Romaine	-24.4
Venasque	-21.4
Villes-sur-Auzon	-19.3

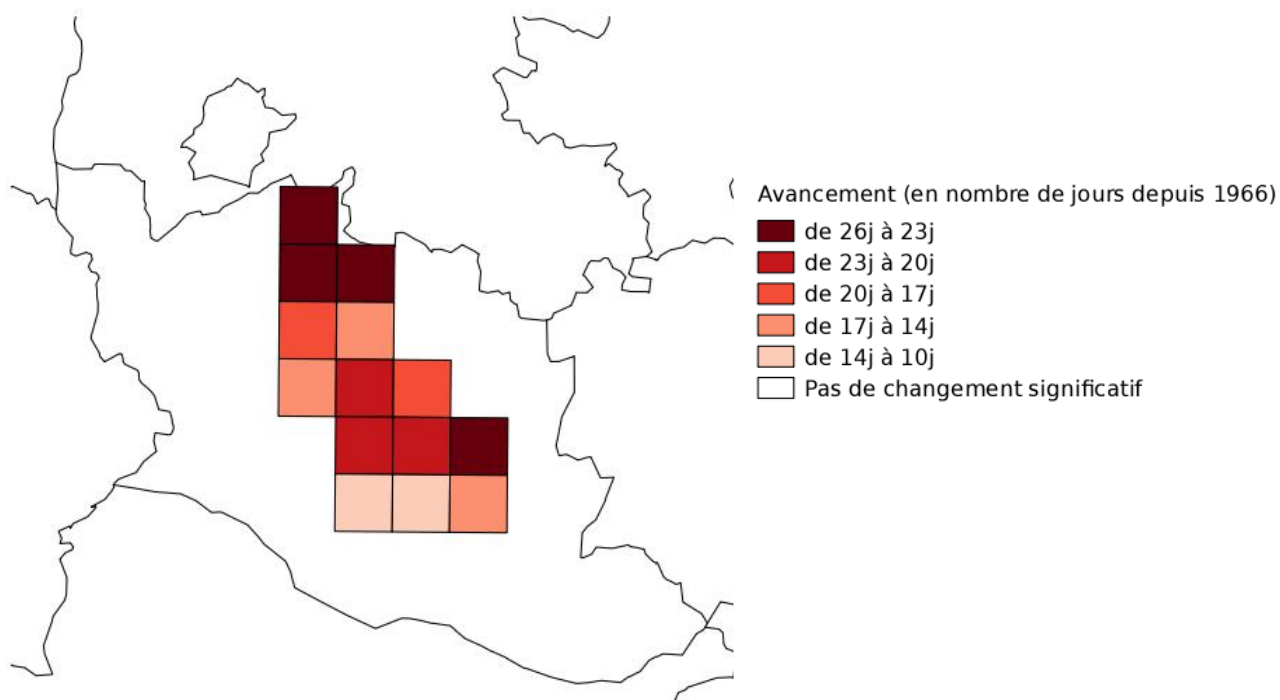


Fig. A2. Cartographie de l'avancement du stade des vendanges sur le territoire du Ventoux

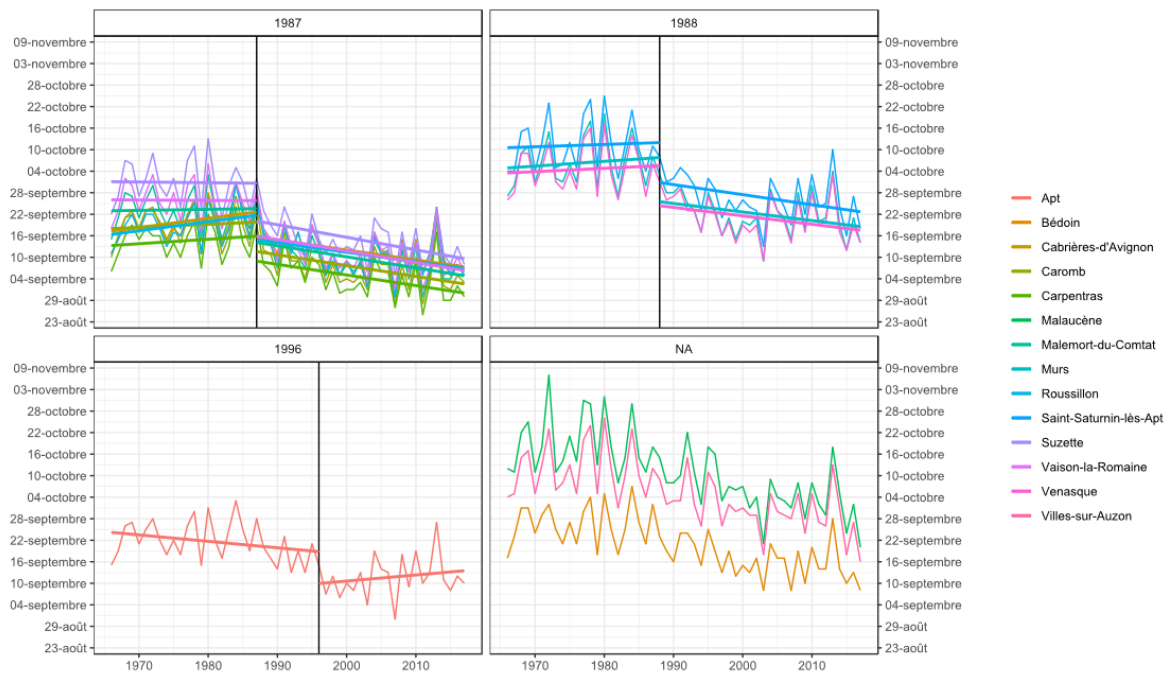


Fig. A3. Détection d'une rupture temporelle dans les dates de vendanges

Annexe 3

Indicateurs écoclimatiques par secteur pour la période 1966-2017

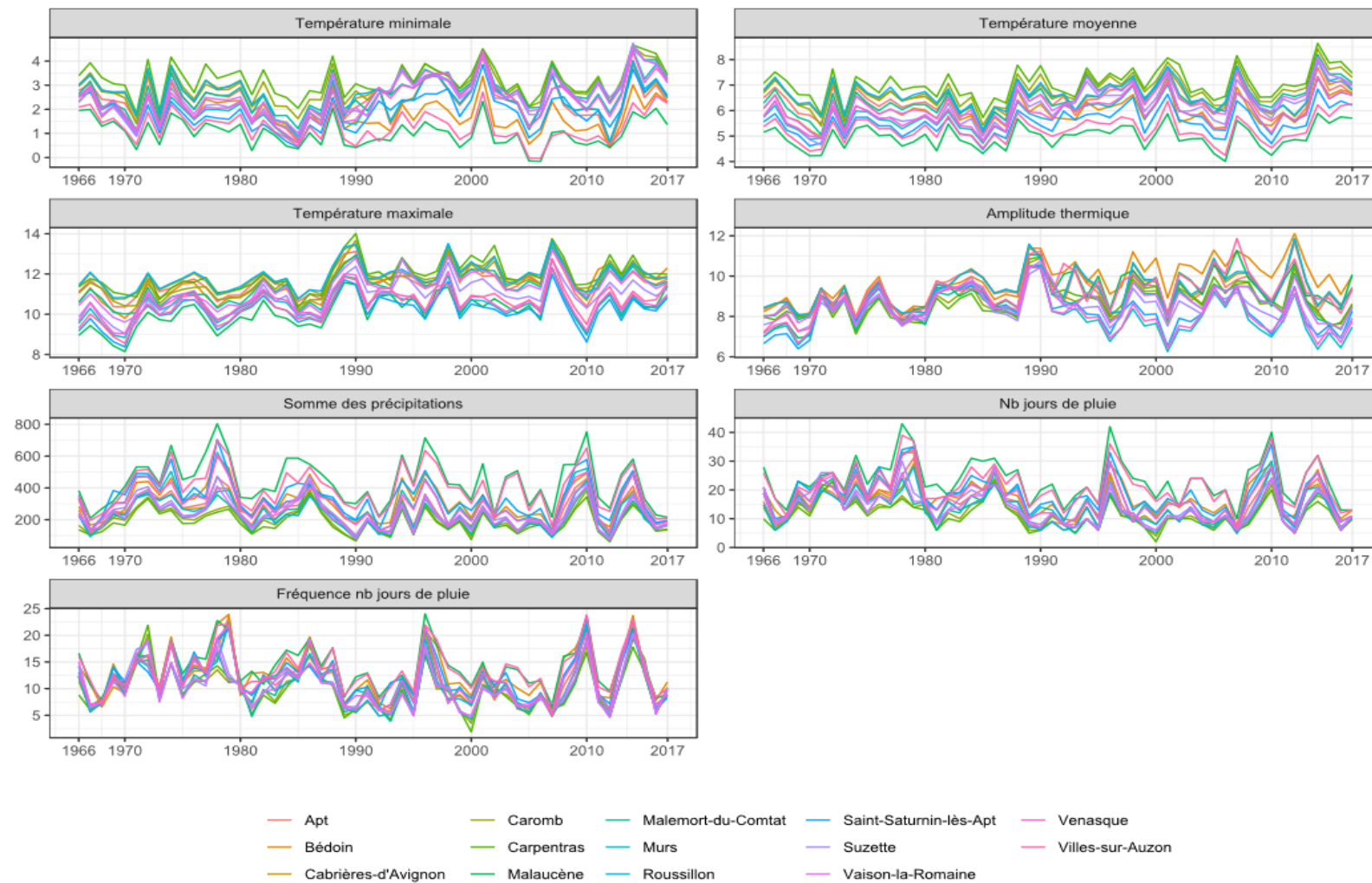


Fig. A4. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase de « post-dormance »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

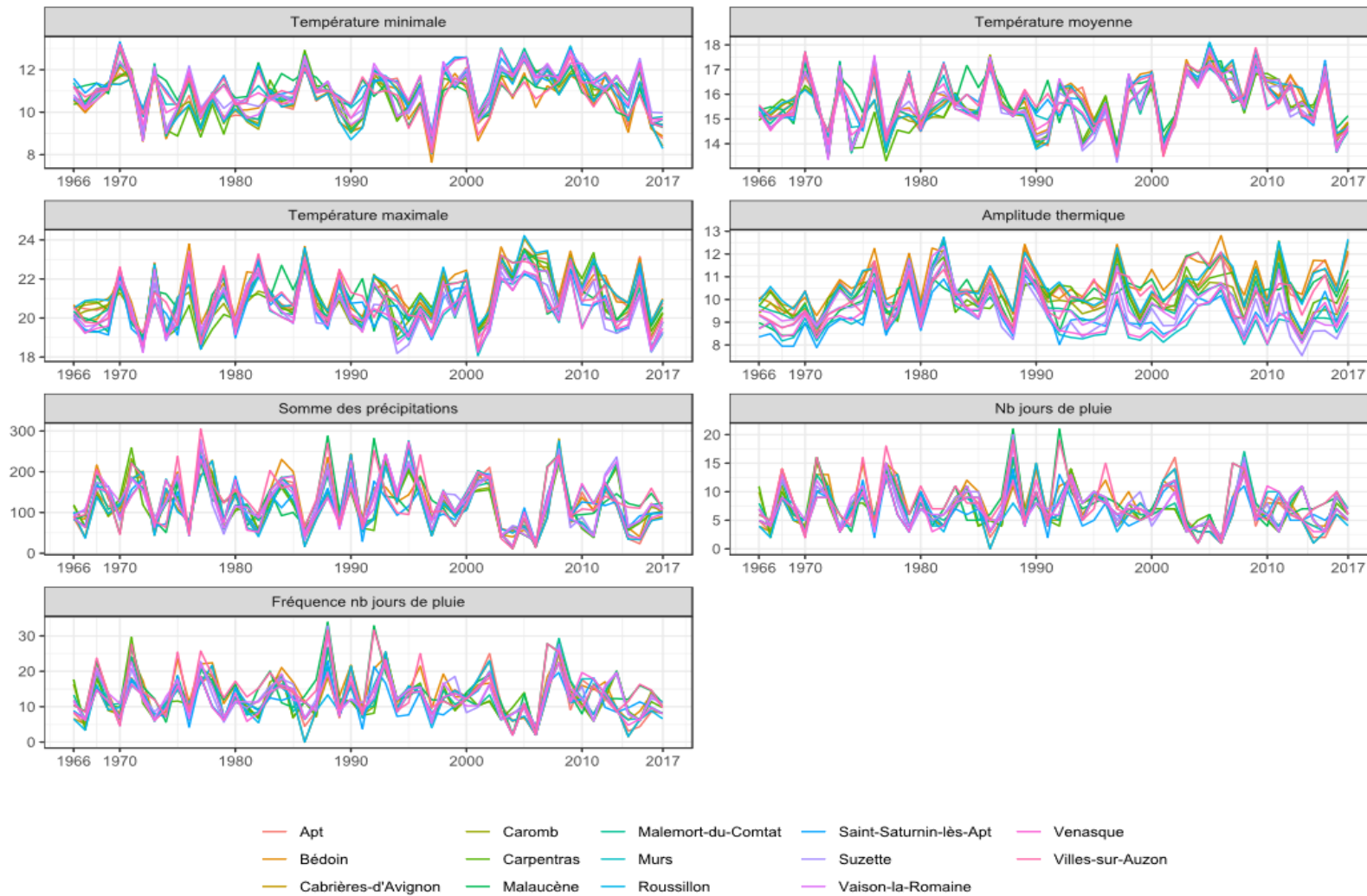


Fig. A5. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la phase de « débourrement-floraison » pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

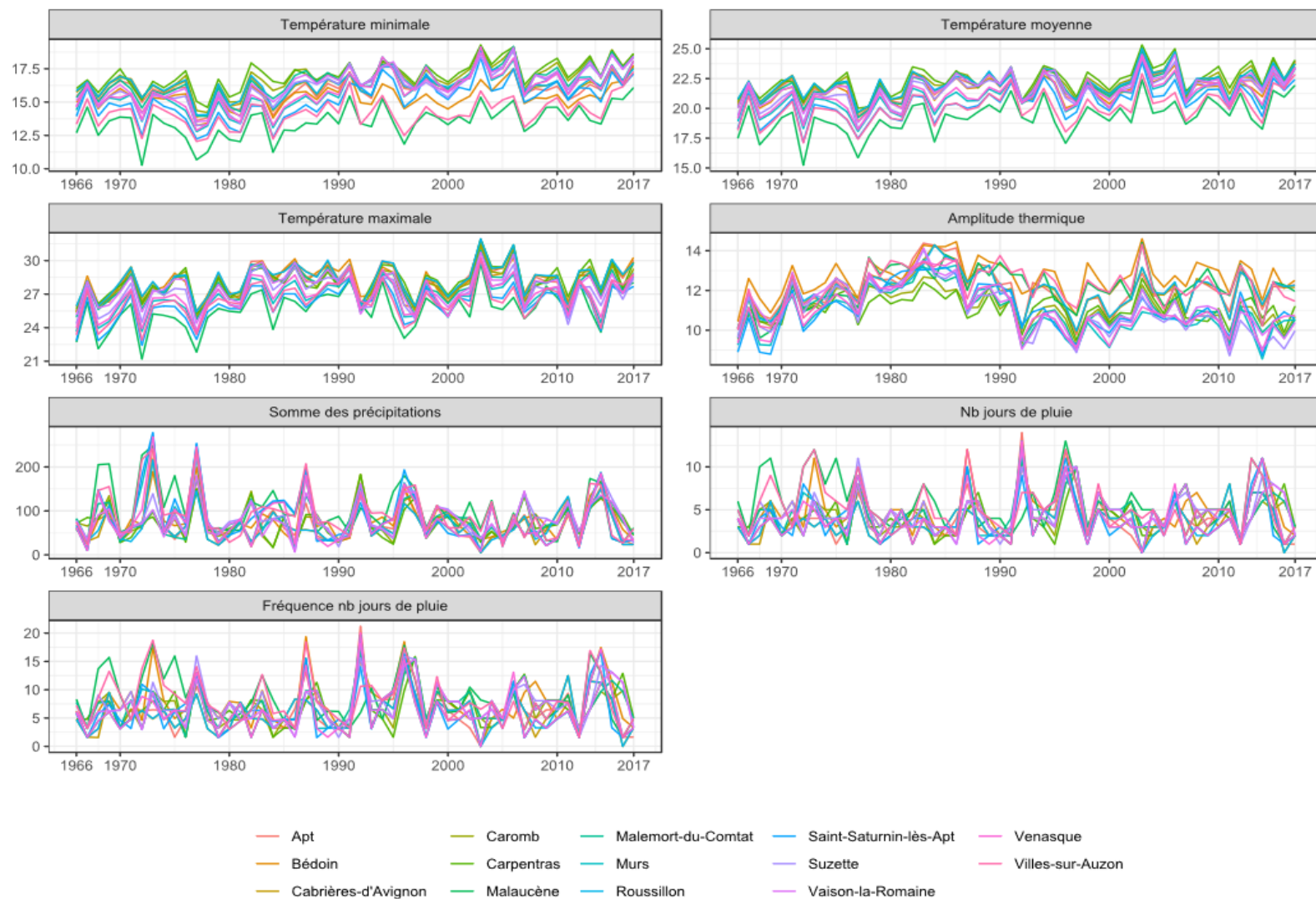


Fig. A6. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase de « floraison-véraison »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

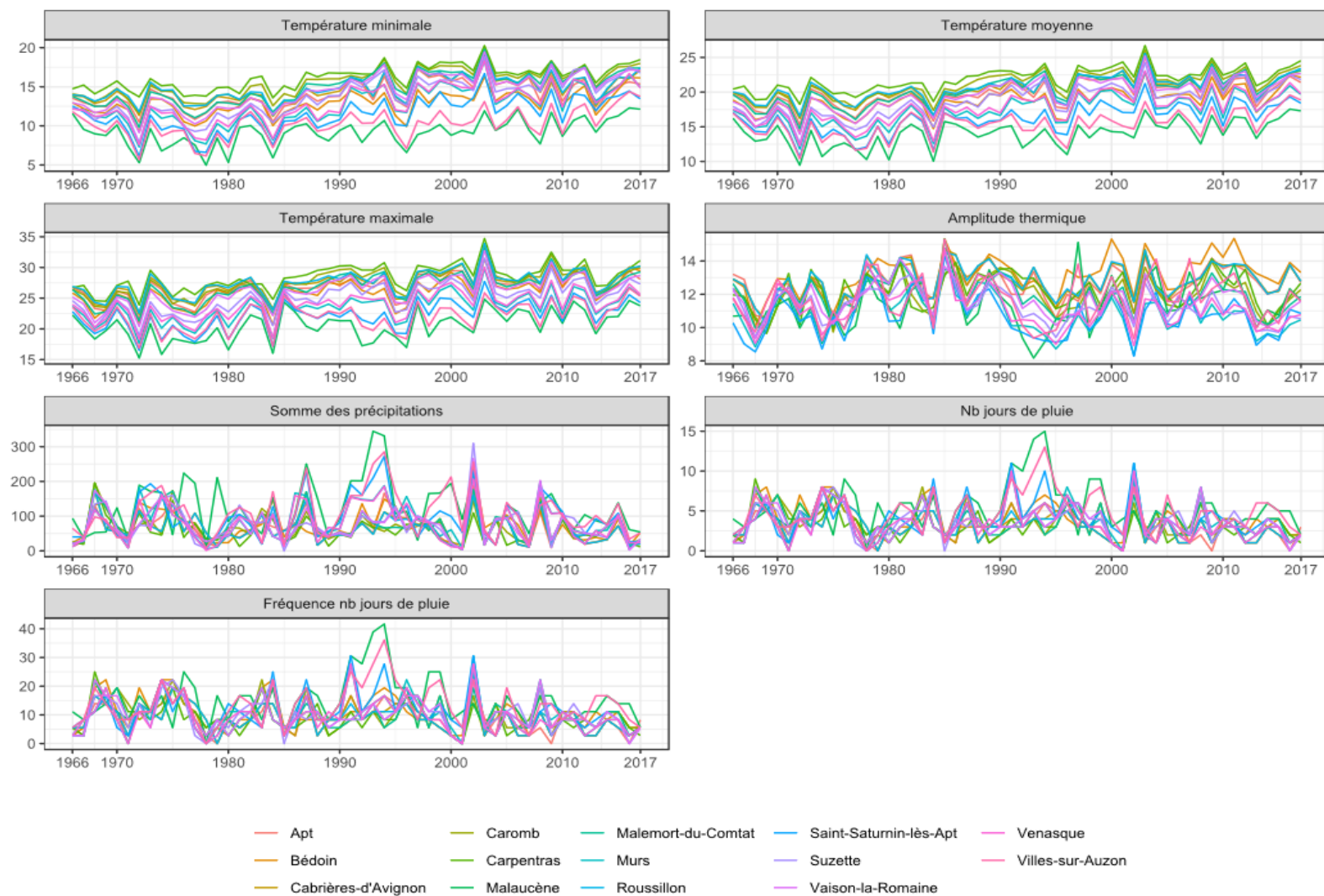


Fig. A7. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la **phase de « véraison plus 35 jours »** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

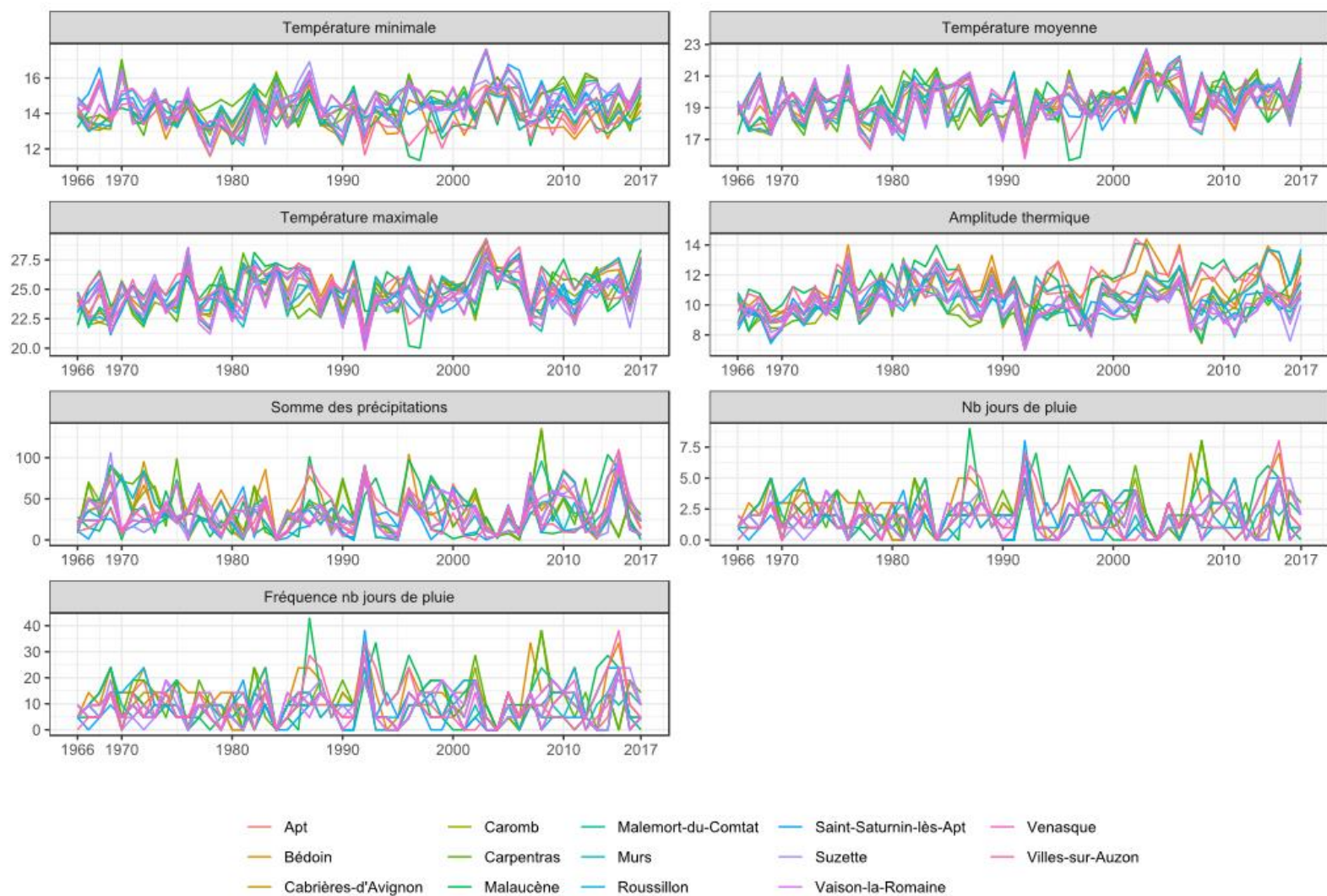


Fig. A8. Evolution des indicateurs de température et de pluie autour du stade **floraison** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

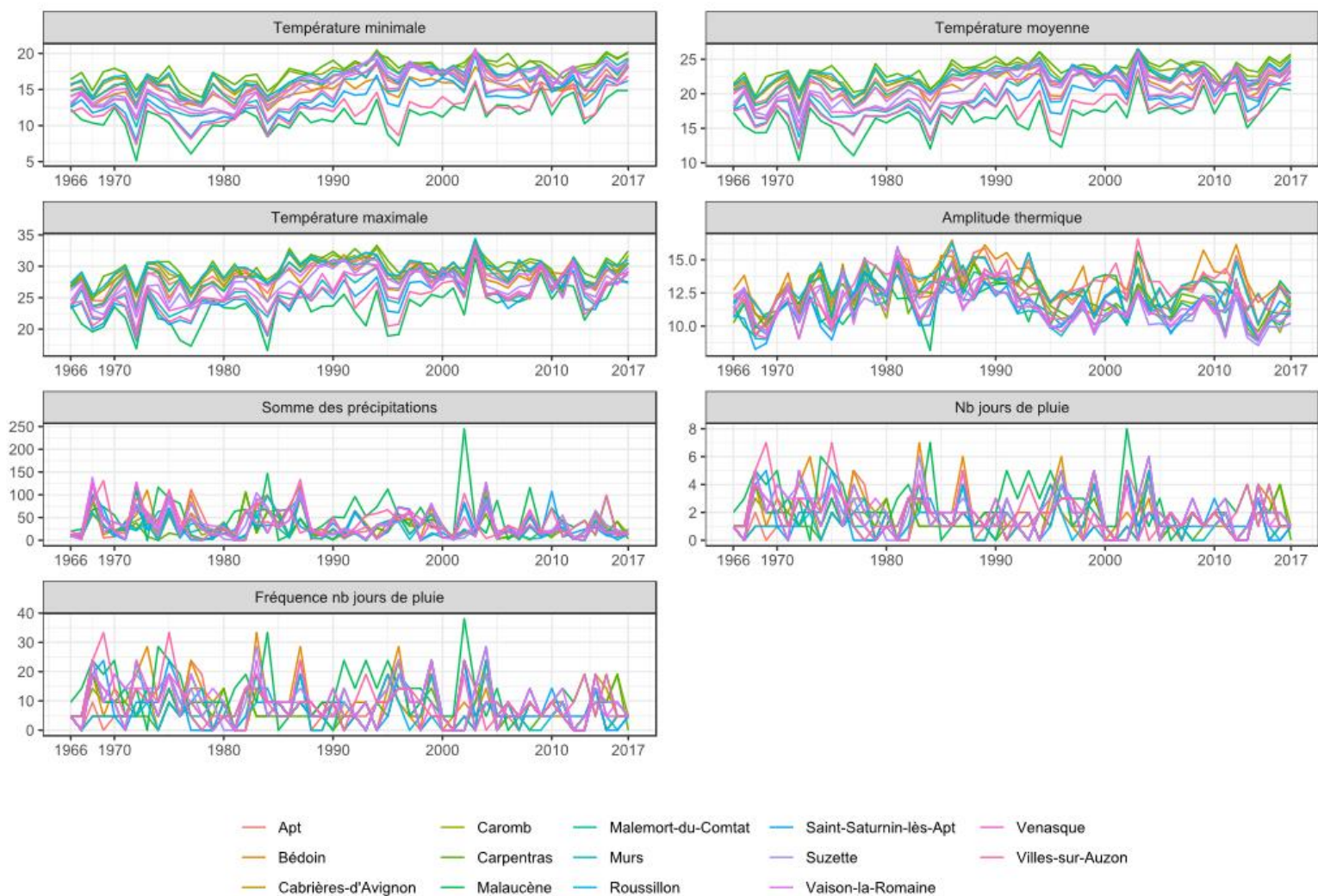


Fig. A9. Evolution des indicateurs de température et de pluie autour du stade **véraison** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

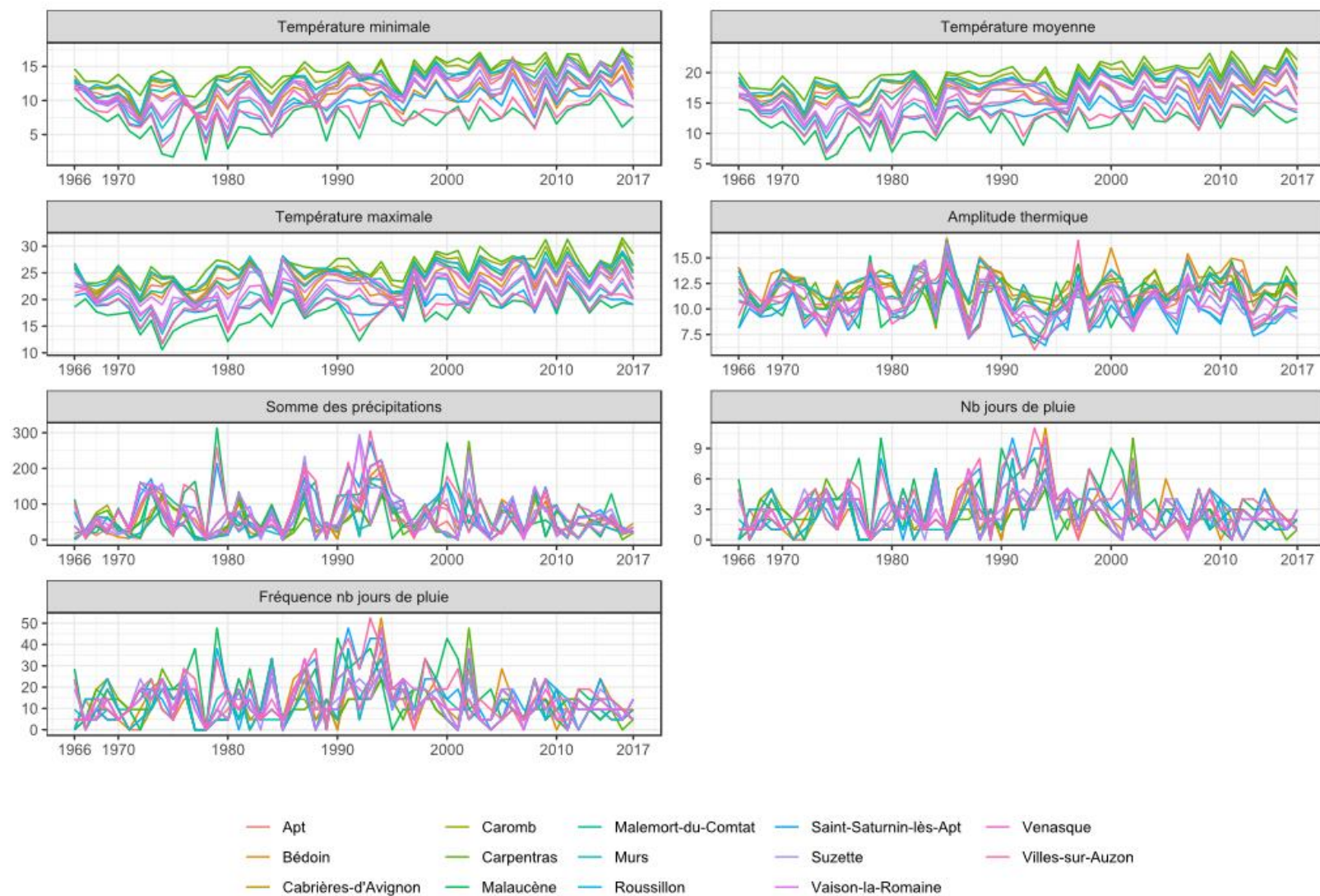


Fig. A10. Evolution des indicateurs de température et de pluie pour la phase de « véraison plus 35 jours » pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

Annexe 4

Indicateurs écoclimatiques autour des stades de floraison et véraison par secteur pour la période 1966-2017.

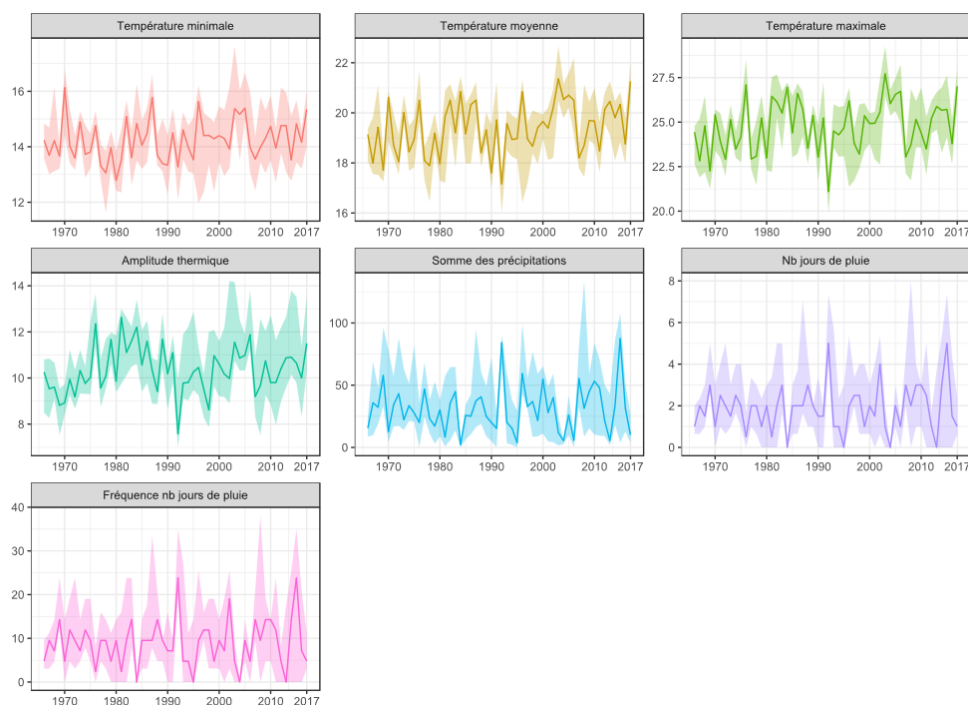


Fig. A11. Evolution des indicateurs de température et de pluie **autour du stade de floraison** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

Fig. A12.

Tableau A2- Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température **autour du stade de floraison** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

Village/Secteur	Amplitude thermique moyenne de la phase	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase
Apt	+1.5°C			
Bédoin	+1.9°C			
Cabrières-d'Avignon	+1.9°C		+1.3°C	+2.1°C
Caromb		+1.1°C		
Carpentras				
Malaucène				
Malemort-du-Comtat				
Murs				
Roussillon	+1.9°C		+1.3°C	+2.1°C
Saint-Saturnin-lès-Apt				
Suzette				
Vaison-la-Romaine				
Venasque				
Villes-sur-Auzon	+1.6°C			

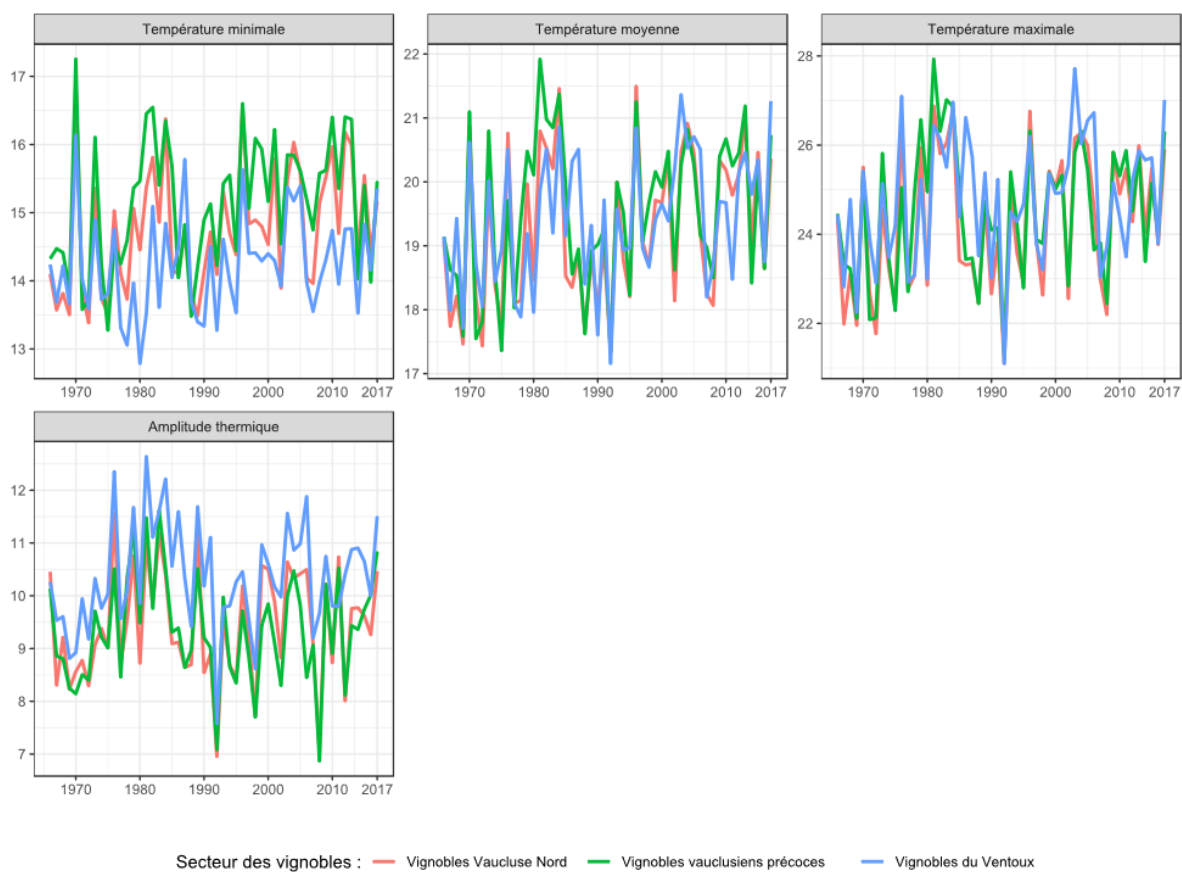


Fig. A13. Evolution des indicateurs de température **autour du stade de floraison** pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vaclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleu) et du vignoble de Côtes du Rhône Vaclusien (ligne orange), et la valeur annuel du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

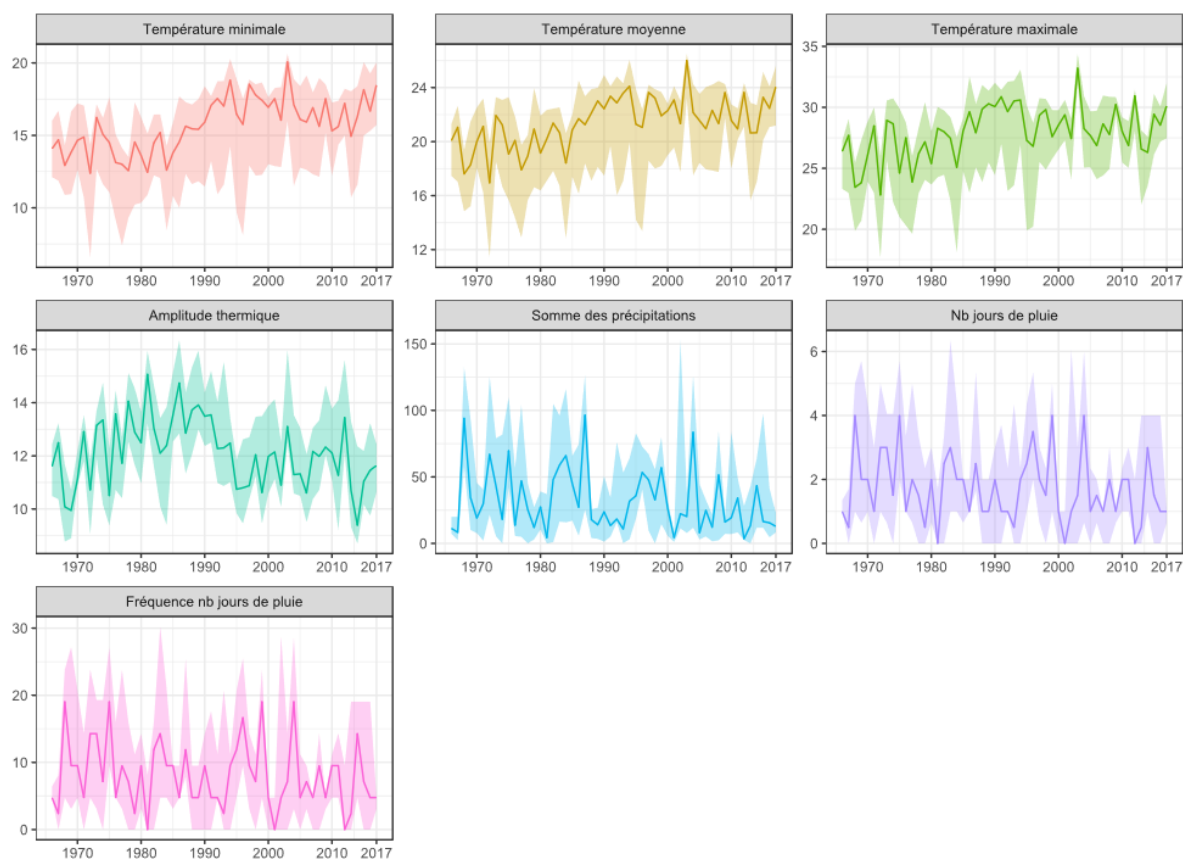


Fig. A14. Evolution des indicateurs de température et de pluie **autour du stade de véraison** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux. Les lignes représentent les médianes du territoire du Ventoux et les rubans colorés représentent les 10^{ième} et 90^{ième} centiles. Les températures sont en degrés Celsius (°C). Les valeurs des précipitations sont en millimètres (mm = l/m²). Nb = Nombre.

Tableau A3.- Valeurs des évolutions significatives des indicateurs de température **autour du stade de véraison** pour les différents secteurs du vignoble du Ventoux pour la période 1966-2017.

Village/Secteur	Nombre de jours de forte chaleur (température maximale > 30°C)	Température minimale moyenne de la phase	Température moyenne de la phase	Température maximale moyenne de la phase
Apt		+2.7°C	+2.7°C	+2.6°C
Bédoin		+2.6°C	+3.0°C	+3.2°C
Cabrières-d'Avignon		+2.5°C	+2.1°C	
Caromb	+5.7 j	+4.1°C	+3.1°C	+2.3°C
Carpentras	+5.9 j	+3.4°C	+2.7°C	+2.3°C
Malauccène	+4.4 j	+4.0°C	+4.7°C	+5.7°C
Malemort-du-Comtat	+6.0 j	+4.7°C	+3.8°C	+2.9°C
Murs	+6.0 j	+5.6°C	+5.2°C	+5.0°C
Roussillon		+2.4°C	+2.1°C	
Saint-Saturnin-lès-Apt	+5.2 j	+5.4°C	+5.6°C	+5.7°C
Suzette		+5.7°C	+4.8°C	+3.7°C
Vaison-la-Romaine		+5.0°C	+4.2°C	+3.3°C
Venasque	+5.7 j	+5.3°C	+4.9°C	+4.6°C
Villes-sur-Auzon	+6.6 j	+3.9°C	+4.4°C	+5.0°C

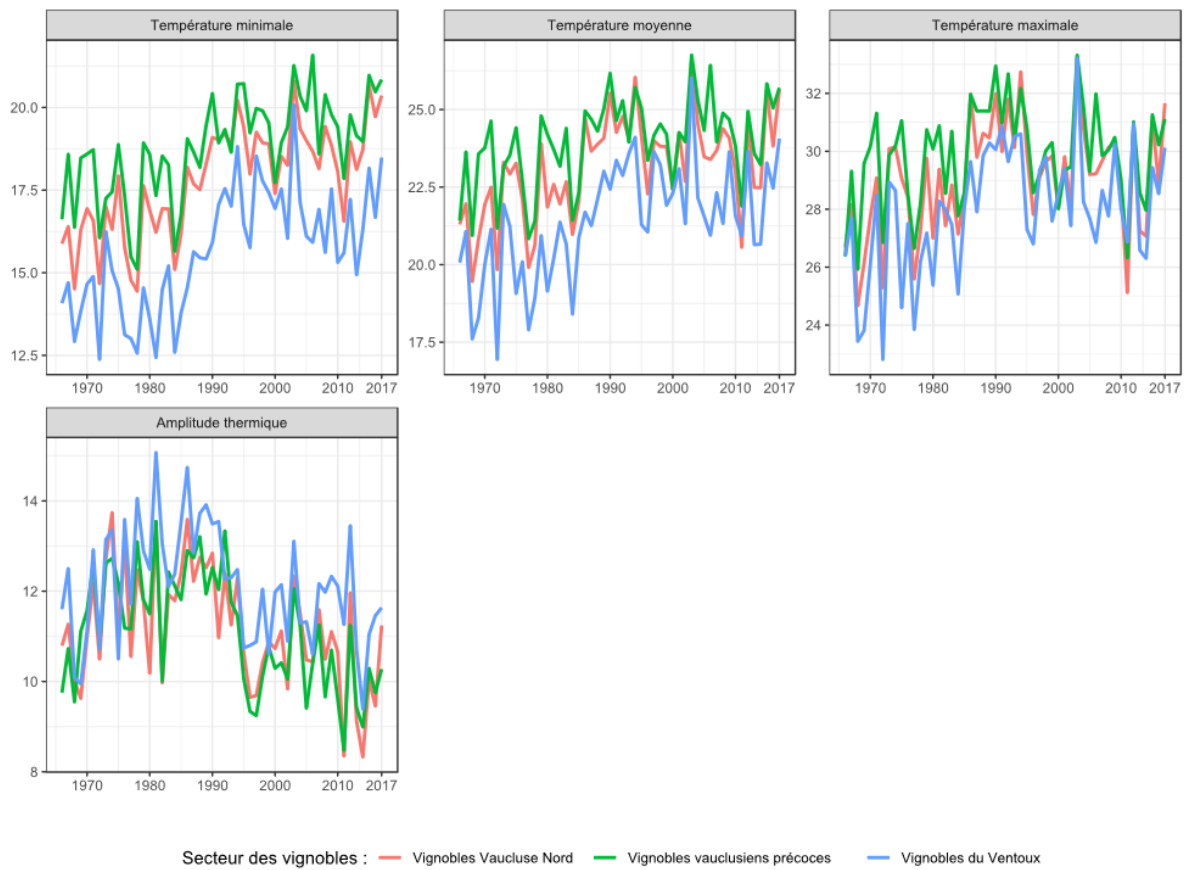


Fig. A15. Evolution des indicateurs de température **autour du stade de véraison** pour le vignoble du Ventoux, le vignoble du Côtes du Rhône Vaclusien et le secteur précoce pour la période 1966-2017. Les lignes représentent les médianes du vignoble du Ventoux (ligne bleu) et du vignoble de Côtes du Rhône Vaclusien (ligne orange), et la valeur annuel du secteur précoce (ligne verte). Les températures sont en degrés Celsius (°C).

Annexe 5

Caractéristiques des sols utilisés dans l'étude

Sol	Type de sol	Profondeur	Réserve utile	Stress modéré	Stress sévère
1	Profond	140	223	23	19.8
2	Peu profond	55	71	32.2	29.6
3	Moyen	120	143	17.4	15

Annexe 6

Evolution de la pluviométrie des principales phases phénologiques.

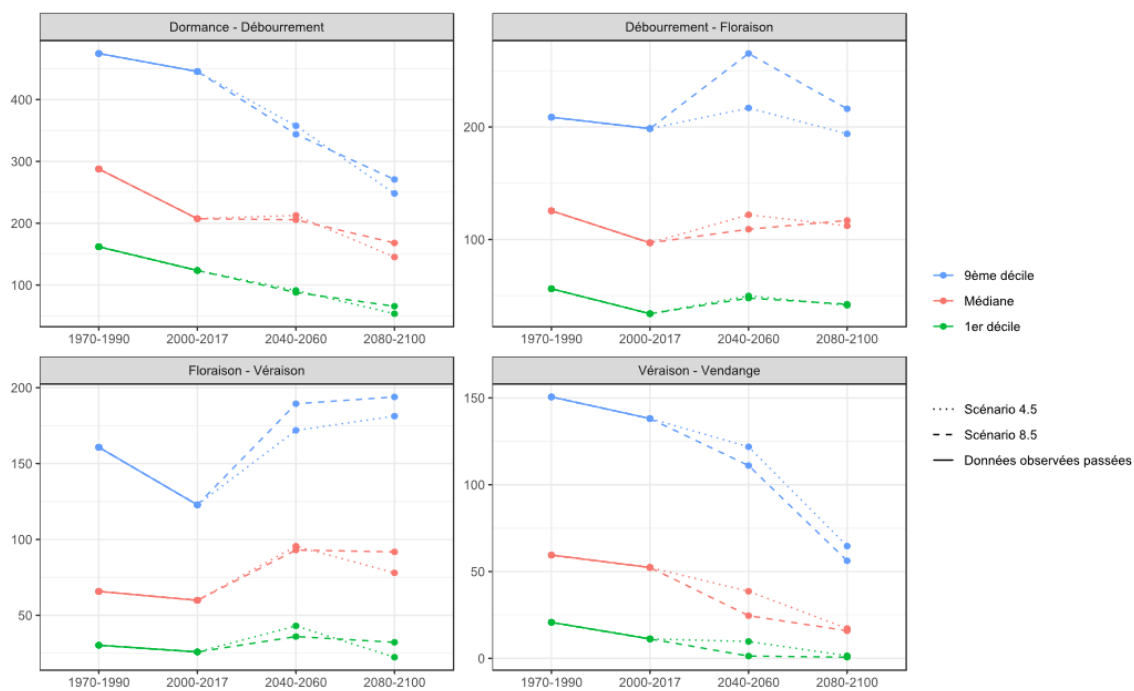


Fig. A16. Evolution de la médiane et des 1^{er} et 9^{ème} décile des du cumul de pluviométrie calculées pour les principales phases de développement. Les valeurs sont calculées sur 4 périodes de 20 ans (1970-1990, 2000-2017, 2040-2060, 2080-2100) et pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (modèle CNRM).

Annexe 7

Evolution de l'état hydrique du sol en fonction des types de sol.

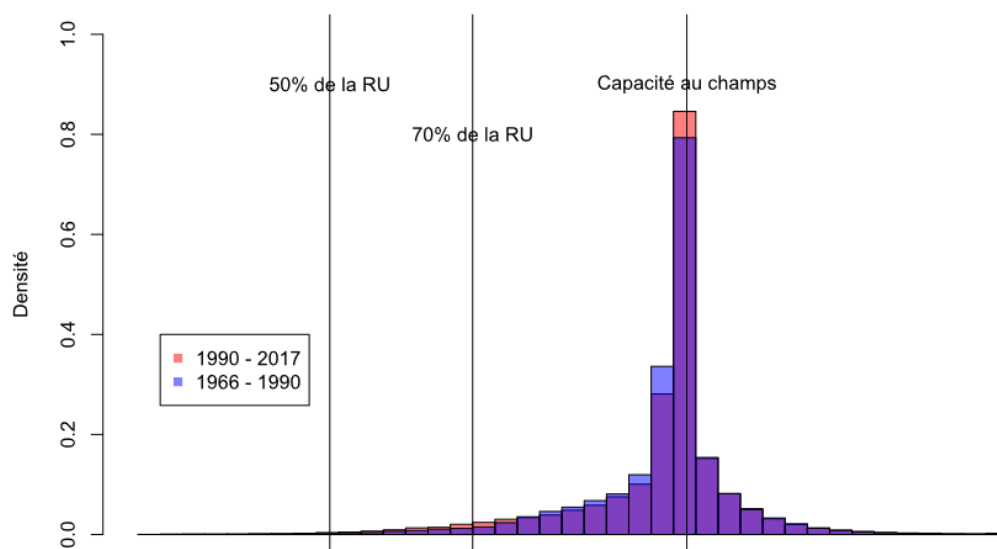


Fig. A17. Distribution de la teneur du sol journalière pour la période passée (1966 -2017). Nous pouvons observer que dans les dernières années, nous avons eu une légère augmentation du nombre de jours avec une teneur en eau du sol à la capacité au champ, mais aussi aux teneurs les plus faibles.

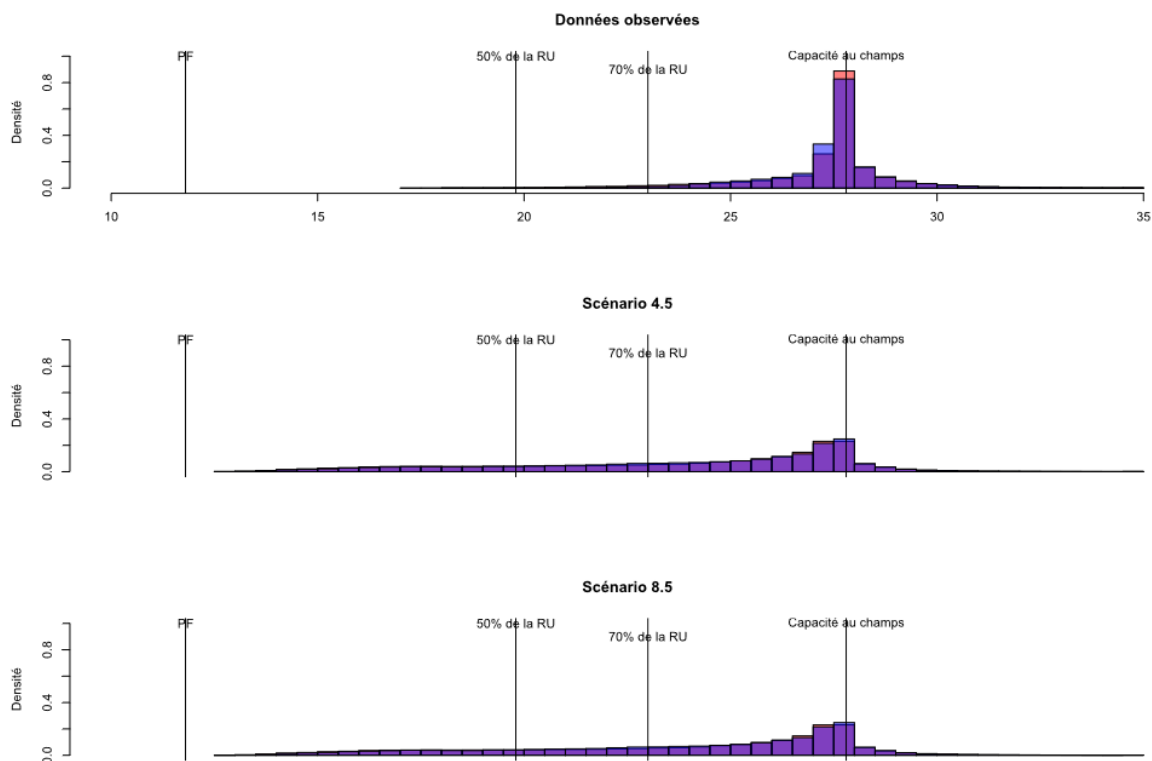


Fig. A18. Distribution de la teneur du sol journalière pour la période passée (Données observées) et les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Nous pouvons observer que dans les deux scénarios on voit une forte diminution du nombre de jours avec une teneur en eau du sol à la capacité au champ, et une forte augmentation (étalement) du nombre de jours avec des teneurs en eau inférieures à 50% de la capacité du champs des sols.

Annexe 8

Analyse du climat 1968 – 2018 à Carpentras (données Climatik US1116 Agroclim INRA).

