



HAL
open science

Impact du changement climatique sur les rendements viticoles en vallée du Rhône

Augustin Dura

► **To cite this version:**

Augustin Dura. Impact du changement climatique sur les rendements viticoles en vallée du Rhône. Sciences agricoles. 2018. hal-03138652

HAL Id: hal-03138652

<https://hal.inrae.fr/hal-03138652>

Submitted on 11 Feb 2021

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.



MÉMOIRE

présenté par Augustin DURA
dans le cadre de la dominante d'approfondissement PISTv

Pour l'obtention du
DIPLOME D'INGÉNIEUR AGROPARISTECH

IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RENDEMENTS VITICOLES EN VALLÉE DU RHÔNE

Encadrant
Nicolas GUILPART

Maître de stage
Iñaki GARCIA DE
CORTAZAR-ATAURI

Stage effectué au sein de l'unité AgroClim de l'INRA

US 1116 Agroclim
Centre INRA PACA
228, route de l'Aérodrome
84000 Avignon

Du 12 mars 2018 au 07 septembre 2018

Soutenu le 27/09/2018

Engagement de non plagiat

Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existant constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sur d'en citer la source.

Sanction

En cas de manquement à ces consignes, le département SIAFEE se réserve le droit d'exiger la réécriture du document, dans ce cas la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

Engagement

Je, soussigné, Augustin Dura,
reconnais avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat
À Paris, le 13 septembre 2018

Résumé

L'agriculture en général, et la viticulture en particulier, sont très sensibles aux variations du climat. Compte tenu de l'importance économique du secteur vitivinicole aux niveaux national et régional, le changement climatique est anticipé et redouté de tous les acteurs de la filière. Dans la région de la *Vallée du Rhône*, les vigneronns en observent déjà les effets *via* une baisse des rendements. Ce travail vise à étudier l'influence du changement climatique sur l'évolution de la phénologie et les rendements. Pour ce faire, des indicateurs écoclimatiques ont été utilisés. Les résultats montrent que la phénologie a évolué de manière significative dans le sens de la précocité, certains stades phénologiques étant jusqu'à deux semaines plus précoces. Les rendements viticoles, après avoir connu un pic autour de 1990, ont régulièrement diminué depuis, pour atteindre une perte de 20% depuis 25 ans. Dans le même temps, le climat a évolué, avec une augmentation significative des températures, du rayonnement et du stress hydrique. Des corrélations ont été trouvées entre certains indicateurs et l'évolution du rendement. Pour la plupart, il s'agit d'indicateurs concernant la température et le statut hydrique de la vigne lors des stades tardifs de l'année précédant la récolte. Quasiment aucun indicateur n'a été positivement corrélé au rendement. Ces résultats aident à comprendre les liens entre le changement climatique et l'évolution des rendements par le passé. Ils pourront participer à une meilleure appréhension des bases éco-physiologiques de l'élaboration du rendement, et éventuellement conduire à une meilleure fiabilité des prédictions de rendement. Cependant, les résultats actuels ne sont pas suffisamment précis pour être utilisés autrement qu'à grande échelle.

Abstract

Climate change is expected to have numerous consequences on agriculture in general and viticulture in particular. In the *Vallée du Rhône* region, in the South of France, its effects have already been observed in the form of yield losses, with potentially terrible consequences on the local economy. In this report, links between climate change and modifications of grapevine phenology and yield are studied, using ecoclimatic indicators. It is found that phenology in the *Vallée du Rhône* is significantly earlier now than it was forty years ago. Yield has experienced a peak in 1990 and decreased steadily since then. At the same time, climate evolved with a significant increase in temperatures, radiations and water stress. Correlations were found between some indicators' evolution and yield variations. Most of them are related to temperature and water status during the late phenological stages of the previous growing season. Almost none had a positive correlation. These results help understanding the links between climate change and yield. They can also provide a basis for better comprehension of the main physiological drivers of yield elaboration, and even to a better yield prediction capability. However, current results are not precise enough and hence only usable at a large scale. To enhance prediction precision and reach smaller scales, further studies should use higher resolution data.

Remerciements

Je finis mon rapport comme à peu près tout ce que j'entreprends : à la dernière minute. C'est pourquoi mon premier réflexe, en écrivant ces remerciements, a été d'inscrire sobrement "*to the happy few*". Je me serais mis sous un bon patronnage, mais cela aurait manqué à la fois d'humilité et de courtoisie : je l'ai donc effacé.

Je souhaite remercier en premier lieu ma famille. Que ferai-je, que serai-je sans elle ? L'ensemble de mes actions est une suite d'efforts pour m'en montrer digne, avec un succès variable.

Ma reconnaissance va ensuite à mes encadrants : mon maître de stage, Iñaki Garcia de Cortazar-Atauri, pour son encadrement et ses conseils judicieux ; et mon tuteur académique, Nicolas Guilpart, pour sa bienveillance et son aide précieuse.

Je remercie également l'ensemble du bâtiment AgroClim, que j'ai eu plaisir à côtoyer pendant les six mois de mon séjour en Provence.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont accompagné pendant ces cinq années de prépa puis d'Agro : leur présence et leur soutien ont été toujours agréables, et parfois salutaires.

Je n'ai pas cité par leur nom tous les membres de ma famille et tous mes amis. Ce n'est pas par ingratitude, mais par pudeur. Qu'ils soient assurés que j'ai adressé à chacun une pensée émue et reconnaissante, et que je leur suis entièrement dévoué.

Paris, le 13 septembre 2018

Augustin Dura

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 7 |
| 1 Contexte | 7 |
| 1.1 Bases du changement climatique | 7 |
| 1.2 La viticulture face au changement climatique | 8 |
| 1.2.1 Les effets attendus | 8 |
| 1.2.2 Evolution attendue de la viticulture | 8 |
| 1.3 Problématique | 8 |
| 2 Matériel et méthodes | 10 |
| 2.1 Zone d'étude et profondeur historique | 10 |
| 2.1.1 Définition d'une zone d'étude | 10 |
| 2.1.2 Profondeur historique retenue | 11 |
| 2.2 Principe général de l'étude | 11 |
| 2.3 Choix d'une méthode d'analyse du climat | 12 |
| 2.3.1 Différentes approches | 12 |
| 2.3.2 Utilisation d'indicateurs climatiques | 13 |
| 2.4 Indicateurs écoclimatiques | 14 |
| 2.4.1 Choix des indicateurs | 14 |
| 2.4.2 Calcul de la phénologie – modèle utilisé | 14 |
| 2.4.3 Simplifications et hypothèses fortes | 16 |
| 2.5 Données utilisées | 16 |
| 2.5.1 Bases de données rendement | 16 |
| 2.5.2 Climat - base de données SAFRAN | 17 |
| 2.6 Traitement statistique | 17 |
| 2.6.1 Évolution et corrélation | 17 |
| 2.6.2 Tests de rupture de pente | 18 |
| 2.6.3 Variabilité des stades phénologiques | 18 |
| 2.6.4 Regroupement des variables | 18 |
| 3 Résultats et discussion | 19 |
| 3.1 Evolution des rendements | 19 |
| 3.1.1 Remarques générales | 19 |
| 3.1.2 A l'échelle des Côtes-du-Rhône | 19 |
| 3.1.3 A l'échelle du département | 19 |
| 3.1.4 A l'échelle d'une exploitation agricole | 19 |
| 3.2 Évolution de la phénologie | 21 |
| 3.2.1 Evolution de la phénologie dans le sens de la précocité | 21 |
| 3.2.2 Tendance à l'uniformisation du territoire | 22 |
| 3.2.3 Réalisation d'un zonage géographique en fonction de la précocité | 22 |
| 3.3 Conclusion sur la phénologie | 23 |
| 3.4 Évolution du climat | 24 |
| 3.4.1 Tendances générales, tendances particulières | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.2 | Evolution des indicateurs de température | 26 |
| 3.4.3 | Evolution des indicateurs hydriques | 27 |
| 3.4.4 | Évolution des paramètres radiatifs | 28 |
| 3.5 | Lien entre climat et rendement | 29 |
| 3.5.1 | Corrélation | 29 |
| 3.5.2 | Tri des variables corrélées | 29 |
| 3.5.3 | Typologie des indicateurs corrélés au rendement | 29 |
| 4 | Limites et perspectives | 30 |
| 4.1 | Limites | 30 |
| 4.1.1 | Problème de résolution | 30 |
| 4.1.2 | Choix de la zone | 30 |
| 4.2 | Perspectives | 31 |
| 4.2.1 | Evolution de la pression en maladies | 31 |
| 4.2.2 | Les apports de l'écophysiologie | 31 |
| 4.2.3 | Les apports de l'informatique | 31 |
| | Conclusion | 32 |
| | Annexe 1 - Indicateurs corrélés au rendement | 36 |
| | Annexe 2 - Précocité et zonage géographique | 37 |
| | Annexe 3 - Indicateurs ayant évolué | 38 |

Introduction

L'ampleur de la marche pour le climat à Paris le 08 septembre 2018, l'impact de la démission de Nicolas Hulot du poste de ministre de l'écologie qui l'a précédé et, quelques années auparavant, le succès de la COP21, sont autant de signes montrant que le changement climatique, autrefois remis en question, est désormais accepté comme une réalité par une large part de la population. Le changement climatique a des implications d'importance inégale selon la zone géographique et le secteur d'activité considéré. Dans le monde de la viticulture, il s'agit d'une réalité d'une importance capitale : les variations de climat, en influant la quantité et la qualité du raisin, influent directement sur leur activité économique. C'est pourquoi les effets du changement climatique, qui se font déjà sentir dans la vallée du Rhône, sont une source d'inquiétude croissante. L'objet du présent document est d'avancer dans la compréhension de l'influence du climat sur les rendements viticoles.

1 Contexte

1.1 Bases du changement climatique

Le climat de la Terre connaît d'importantes variations en fonction de la zone géographique, de son activité géologique, et même de sa position dans l'espace. Depuis quelques 2 millions d'années, l'hémisphère Nord oscille entre périodes glaciaires et inter-glaciaires. Cette variation semble trouver ses origines principales dans la distribution du rayonnement solaire sur la surface terrestre [Milankovitch, 1941, Deneux, 2002].

L'apparition d'*Homo sapiens*, il y a quelques 200 000 ans, n'avait *a priori* rien pour rompre cette alternance, tant l'impact de celui-ci sur le climat planétaire était négligeable [Météo-France, 2018]. Mais le développement de la technologie, joint à une explosion de la démographie, a conduit l'Homme à émettre tant de dioxyde de carbone depuis la fin du XIX^{ème} siècle qu'il a fini par avoir une influence déterminante sur le climat [Météo-France, 2018, GIEC, 2014].

Cela se traduit principalement par : (i) une augmentation des températures minimales, moyennes et maximales, et (ii) une augmentation des événements climatiques "extrêmes" [GIEC, 2014].

Bien que la réalité du changement climatique et du rôle de l'Homme dans celui-ci soit admise depuis longtemps par la communauté scientifique, le consensus a mis longtemps à être atteint dans la sphère publique [GIEC, 2014, Oreskes and Conway, 2010]. Malgré quelques exceptions, il est aujourd'hui largement accepté : les initiatives gouvernementales successives comme le Sommet de Rio (1992) et la COP 21 (2015) ne visent plus à empêcher mais à minimiser les effets du changement climatique, qui se font déjà sentir dans la plupart des régions et des secteurs d'activité.

Parmi ceux-ci, l'agriculture en général, et la viticulture en particulier, sont durement touchées.

1.2 La viticulture face au changement climatique

1.2.1 Les effets attendus

La viticulture est un secteur largement touché et vulnérable face au changement climatique [Caubel et al., 2015, Romero et al., 2016, Molitor and Keller, 2016]. Il a été montré que le climat influence largement le développement des plantes, au point que sa modification peut entraîner de vastes changements dans la distribution des aires de culture de certaines plantes [Holzkämper et al., 2013, Caubel et al., 2015]. C'est ainsi que des territoires comme l'Île-de-France ou le bassin londonien deviennent des territoires propices à la viticulture [Monde, 2013, Page et al., 2016]. La situation est tout autre dans la vallée du Rhône, où les conditions sont déjà propices à la viticulture (fort ensoleillement, températures chaudes, ventilation par le mistral) : on craint qu'une augmentation trop forte des températures jointe à une diminution des précipitations ne rende cette zone impropre à la culture de la vigne.

1.2.2 Evolution attendue de la viticulture

Les effets réels du changement climatique sur la viticulture sont difficiles à anticiper, car la modification de plusieurs variables climatiques à la fois peut avoir des conséquences inattendues. Ainsi, si l'augmentation du stress hydrique peut diminuer la pression en maladies en asséchant plus rapidement les feuilles et fruits après une pluie, cette même augmentation peut être néfaste au bon développement du raisin et l'empêcher d'atteindre sa maturité [Dry and Coombe, 2004, Caubel et al., 2015, Korkutal et al., 2011]. De la même manière, l'ampleur réelle du changement d'aire de culture de la vigne est encore sujette à débats [van Leeuwen et al., Page et al., 2016]

Toutefois, certains points font consensus. On considère ainsi que les principaux effets attendus face au réchauffement climatique sont (i) un avancement de la phénologie, (ii) une modification des rendements et de la composition des raisins et enfin, découlant de ce qui précède : (iii) un changement de l'aire de culture de la vigne [Romero et al., 2016, Caubel et al., 2015, Holzkämper et al., 2013, Page et al., 2016].

Certains de ces effets se font déjà sentir, comme l'évolution de la phénologie, et la diminution des rendements. Cette dernière est observée empiriquement par les viticulteurs depuis des années. Or celle-ci peut avoir des conséquences dramatiques, compte tenu de l'importance capitale de la viticulture dans l'économie des régions où elle est pratiquée [Danel, 2009]. La vallée du Rhône, et le Vaucluse en particulier, sont des exemples de telles régions. La viticulture en Vaucluse représente ainsi 45% de la Surface Agricole Utile [Danel, 2009].

1.3 Problématique

C'est pourquoi la Chambre d'Agriculture du Vaucluse et le Syndicat des Vignerons des Côtes du Rhône, ayant constaté les prémices des effets du changement

climatique, ont posé les questions suivantes :

1. La baisse des rendements observée empiriquement est-elle vérifiée statistiquement ?
2. Que peut-on dire de l'influence du climat sur le rendement ?

Ces deux questions appellent naturellement à trois objectifs concrets :

1. Caractériser l'évolution des rendements
2. Caractériser l'évolution du climat
3. Chercher des liens entre ces deux évolutions

Pour illustrer le traitement de ces objectifs, nous présenterons d'abord le travail qui a été réalisé pour choisir la méthode de traitement du problème, puis les résultats obtenus avant de prendre du recul pour les considérer sous un regard critique.

2 Matériel et méthodes

2.1 Zone d'étude et profondeur historique

2.1.1 Définition d'une zone d'étude

Le vignoble de la vallée du Rhône (figure 2) est un territoire très vaste, soumis à des climats qui peuvent être très différents.

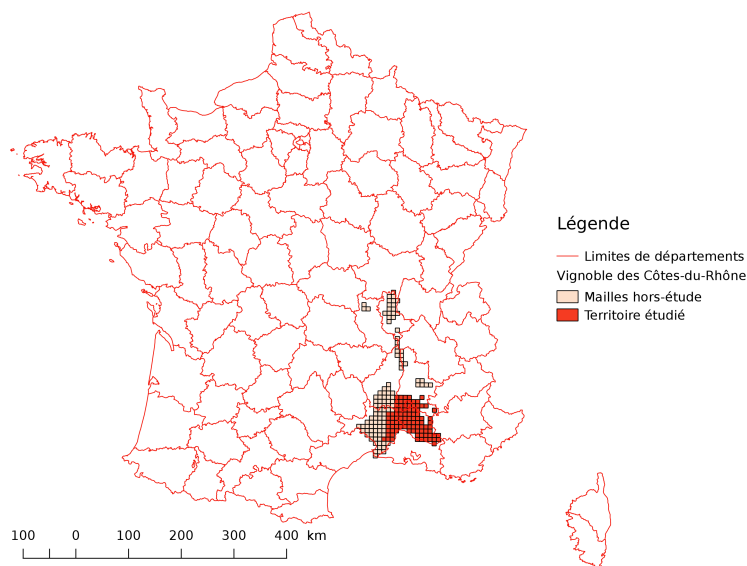


FIGURE 2 – Situation de la zone d'étude au sein du vignoble de la vallée du Rhône

Les pentes abruptes de Côte-Rôtie, à proximité immédiate du Rhône à Ampuis (69) ont un climat naturellement bien différent des plaines du Gard où de Beaumes-de-Venise (84), sur les contreforts du mont Ventoux. C'est pourquoi pour la présente étude le choix a été fait de ne pas travailler sur l'ensemble de l'aire d'appellation, et de se limiter à une zone centrée autour du Vaucluse, sur la zone traditionnellement connue sous le nom générique de *Côtes-du-Rhône méridionales*, illustrée en figure 3 .

Cette zone recouvre le Vaucluse dans son ensemble, et ajoute quelques territoires des départements limitrophes (Drôme et Gard), qui ont été sélectionnés pour leur proximité géographique et climatique avec le Vaucluse (Olivier Jacquet, communication personnelle).

Utilisation de mailles La forme réelle de la zone étudiée, qui est un ensemble de carrés de 8 km de côté, tient à la base de données sélectionnée pour analyser le climat, qui sera justifiée dans les prochains paragraphes. La zone retenue fait 92 mailles, soit 5888km^2 . Les altitudes varient entre 3m au niveau du Rhône et 1000m sur les contreforts du mont Ventoux.

2.1.2 Profondeur historique retenue

L'objectif de ce travail étant d'étudier une variation des rendements viticoles associée à une variation du climat, les données recueillies devaient embrasser une période suffisamment pour pouvoir dessiner des tendances statistiques. La longueur des séries dépend de la base de données : les données climatiques, issues de la base SAFRAN, remontent jusqu'à 1956. Les valeurs de rendement, elles, ne sont pas égales quant à leur profondeur historique : les relevés départementaux sont facilement accessibles jusque 1974, tandis que certains jeux issus d'exploitations particulières ne sont parfois disponibles qu'à partir de 1992. Le tableau 3 résume la profondeur historique des différentes bases de données. La plupart du temps, c'est l'année 1974 qui a été retenue, mais lorsque cela a été possible nous avons fait remonter l'analyse un peu plus loin (1966 pour les analyse de phénologie).

2.2 Principe général de l'étude

Étudier l'influence du climat sur la viticulture est d'une grande complexité : en effet, le rendement de la vigne s'élabore durant les deux années précédant les vendanges [Guilpart et al., 2014b, Molitor and Keller, 2016], et durant cet intervalle de temps la vigne est sujette à de nombreux événements climatiques qui interagissent et rendent leur compréhension difficile. Pour pallier cela, on a l'habitude de procéder à trois décompositions : du rendement, de l'année et du climat.

Le climat, d'abord, est décomposé en variables climatiques simples. Les deux années précédant la récolte sont divisées en différentes périodes, le plus souvent définies par la phénologie de la vigne. On peut donc étudier une variable climatique au cours d'une période d'intérêt pour la vigne.

Enfin, rendement est décomposé comme suit :

$$\eta = d * R * I * F * K * P$$

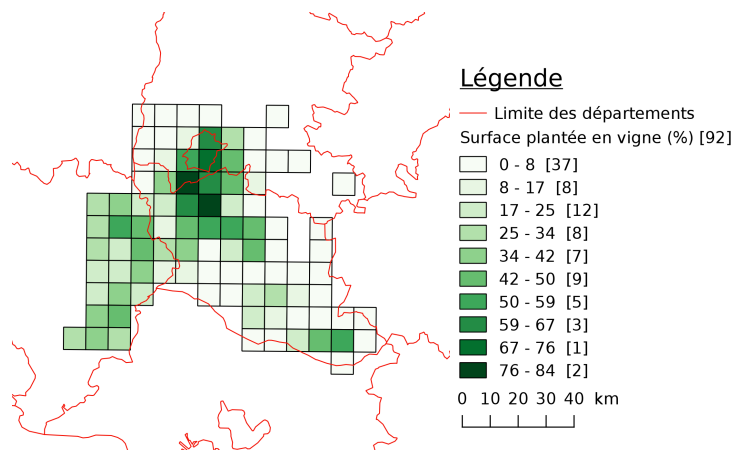


FIGURE 3 – Zone d'étude : surface plantée en vigne dans chaque maille (valeurs issues de la base de données Corine-Land-Cover)

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} \eta : \text{rendement} \\ d : \text{densité de plantation (ceps/ha)} \\ R : \text{nombre de rameaux par cep (cep}^{-1}\text{)} \\ I : \text{nombre d'inflorescences par rameau (rameau}^{-1}\text{)} \\ F : \text{nombre de fleurs par inflorescence (inflorescence}^{-1}\text{)} \\ K : \text{fruit-set, i.e. nombre de fleurs qui se transforment en baie} \\ P : \text{volume de jus par baie (hL/baies}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

L'intérêt de cette dernière composition est que, sachant que certaines de ces composantes sont déterminées au cours de périodes précises, on peut ainsi analyser finement l'effet d'une variable climatique sur une période cultural. On considère ainsi que la variation du rendement est imputable à 60% au nombre de grappes par cep, à 30% au nombre de grains par grappe et à 10% par le poids de ces grains.

Ainsi, cette triple décomposition nous permet d'étudier l'effet du climat sur le rendement.

2.3 Choix d'une méthode d'analyse du climat

2.3.1 Différentes approches

Pour étudier l'effet de telle ou telle variable climatique sur la vigne, une possibilité est de travailler en atmosphère contrôlée. Ainsi, Ebadi May et Coombe [1996] ont évalué l'effet conjoint du rayonnement et de la température sur le taux de nouaison de la vigne à l'aide de plants en pots placés dans des serres, où les paramètres de température et de rayonnement étaient parfaitement contrôlés. Usant d'une autre approche, Keller [2010] a installé des dispositifs permettant de souffler de l'air à température constante sur les bourgeons.

Ces approches, quoiqu'élégantes, présentent un triple inconvénient : d'abord, elles ne permettent d'évaluer qu'un paramètre climatique à la fois ; ensuite, elles sont lourdes à mettre en place ; enfin, elles permettent de tirer des conclusions sur l'effet d'une variable sur le développement d'une culture mais sont inaptes à donner des informations sur les effets conjugués d'une multitude de facteurs climatiques sur le développement d'une culture tout au long d'une saison. De plus, le rendement de la vigne s'élabore sur deux années consécutives [Vasconcelos et al., 2009, Guilpart et al., 2014a], aussi les effets du climat sur le rendement ont une latence qui contraint à réaliser des expérimentations dans la durée. Certains ont accumulé au cours d'une même expérimentation suffisamment de données pour en tirer des conclusions. Romero *et al.* [2016], en particulier, ont étudié des plants de vigne durant sept années consécutives et ont mis en évidence un effet du climat sur l'élaboration du rendement. Mais là encore, le poids de la mise en oeuvre d'une telle expérimentation se révèle trop important.

Ces approches sont utiles, mais peu adaptées à la problématique, qui consiste non pas à comprendre l'effet d'un paramètre climatique sur la vigne, mais bien l'effet des variables climatiques de la vallée du Rhône sur les rendements observés et leur évolution.

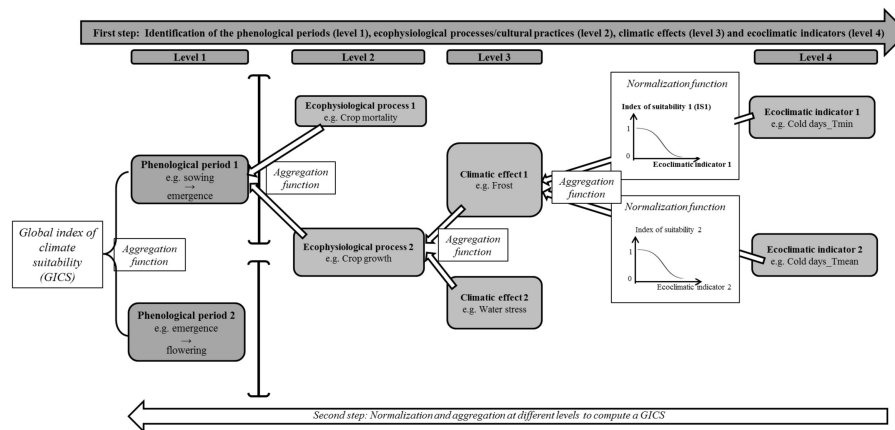


FIGURE 4 – Principe général de l’utilisation d’indicateurs éoclimatiques tel que décrit par Caubel *et al.* [2015]

2.3.2 Utilisation d’indicateurs climatiques

À cet égard, l’utilisation d’indicateurs éoclimatiques apparaît comme une méthode adaptée aux objectifs fixés. Le principe général de la méthode des indicateurs a été très bien décrit dans la littérature, notamment par Caubel *et al.* [2015]. La figure 4 illustre l’approche utilisée.

L’Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) définit un indicateur comme *une information, associée à un phénomène, permettant d’en caractériser l’évolution dans le temps* [ONERC, 2018]. Un indicateur climatique est une grandeur numérique dérivant d’une variable climatique permettant d’en décrire l’amplitude et l’évolution. Étant calculé sur une période de temps donnée, il permet d’étudier le phénomène *au cours d’une période d’intérêt de la plante*. Si la plupart des études ayant recours à de tels indicateurs sont réalisées sur des périodes de temps à dates fixes [Caubel *et al.*, 2015], certaines études les calculent au cours de phases phénologiques identifiées, ce qui accroît leur pertinence.

L’utilisation principale qui a été faite des indicateurs éoclimatiques a été la cartographie des espaces propices à certaines cultures, et en particulier la prédiction de leur évolution [Caubel *et al.*, 2015, Holzkämper *et al.*, 2013, Mosedale *et al.*, 2002]. Pour ce faire, les indicateurs sont agrégés entre eux afin d’obtenir un indice final qui permet d’évaluer l’adaptation d’une culture à un contexte pédo-climatique.

L’utilisation d’une telle agrégation paraît superflue dans le cas présent, où il s’agit au contraire de décomposer au maximum l’effet de chaque paramètre climatique sur le rendement. Aussi avons-nous choisi de travailler sur les indicateurs bruts.

| Indicateur | unité | Indicateur | unité |
|-----------------------------------|---------|-----------------------------|-------|
| <i>Température</i> | | <i>Pluie</i> | |
| T.MIN | Celsius | RAIN.SUM | mm |
| T.MAX | | RAIN.DAYS | jours |
| T.AMP | | RAIN.FREQUENCY | % |
| HEAT.FREQUENCY | % | SERHEAVYRAIN.DAYS | jours |
| HEAT.SPELL | - | SERHEAVYRAIN.FREQUENCY | % |
| HEAT.DAYS | jours | <i>Contrainte hydrique</i> | |
| COLDTMEAN.DAYS | jours | WATERSTRESS.FREQUENCY.soil1 | % |
| FROST.SPELL | - | WATERSTRESS.DAYS.soil2 | jours |
| COLDTMIN.FREQUENCY | % | WATER.DEFICIT | mm |
| COLDTMIN.DAYS _{flower} | % | WATERSTRESS.FREQUENCY.soil2 | % |
| COLDTMIN.DAYS _{plantlet} | % | WATERSTRESS.FREQUENCY.soil3 | % |
| COLDTMIN.DAYS _{leave} | % | WATERSTRESS.DAYS.soil1 | jours |
| <i>Radiations</i> | | DROUGHT.SPELL | - |
| RADIATION.AVERAGE | W/m2 | WETSOIL.FREQUENCY.soil1 | % |
| RADIATION.SUM | W/m2 | WETSOIL.DAYS.soil2 | jours |
| Vent | | WETSOIL.DAYS.soil3 | jours |
| HIGHWIND.DAYS | jours | WETSOIL.DAYS.soil1 | jours |
| HIGHWIND.FREQUENCY | % | WETSOIL.FREQUENCY.soil2 | % |
| | | WETSOIL.FREQUENCY.soil3 | % |

TABLE 1 – Liste des indicateurs sélectionnés et leur unité

2.4 Indicateurs écoclimatiques

2.4.1 Choix des indicateurs

Critères de choix

Le choix des indicateurs pertinents a été fait selon trois critères :

- Les indicateurs présentés comme pertinents par la littérature, c'est à dire dont une valeur ou une évolution au cours d'une période phénologique donnée peut avoir une influence sur le rendement final.
- A cette première liste ont été ajoutés des indicateurs indiqués par la pratique et le terrain comme potentiellement intéressants à explorer ("*dires d'experts*").
- Enfin, nous avons ajouté, par acquis de conscience, des indicateurs "*de bon sens*", c'est à dire des indicateurs issus de grandeurs ayant une forte influence sur le rendement (principalement la température et les précipitations) que nous avons étudiées sur l'intégralité du cycle plutôt que les seules périodes où elles sont censées avoir le plus d'impact.

Il en résulte la liste du tableau 1.

2.4.2 Calcul de la phénologie – modèle utilisé

Le calcul des indicateurs éco-climatiques a mis en jeu un modèle développé par l'unité AgroClim de l'INRA [Morales-Castilla et al., soumis]. Ce modèle dis-

| Nom du stade | Nom commun | Mode de calcul |
|--------------|-------------------------|----------------------|
| S0 | / | Fixe au 31 juillet |
| S1 | Dormance | Cumul de froid |
| S2 | Débourrement | Cumul de chaud |
| S3 | Floraison | Cumul de chaud |
| S4 | Véraison | Cumul de chaud |
| S5 | Vendanges | Stade S_5 + 35 jours |
| S6 | Débourrement - 10 jours | Stade S_2 - 10 jours |
| S7 | Débourrement + 10 jours | Stade S_2 + 10 jours |
| S8 | Floraison - 10 jours | Stade S_3 - 10 jours |
| S9 | Floraison + 10 jours | Stade S_3 + 10 jours |
| S10 | Véraison - 10 jours | Stade S_4 - 10 jours |
| S11 | Véraison + 10 jours | Stade S_4 + 10 jours |
| S12 | Vendanges - 10 jours | Stade S_5 - 10 jours |
| S13 | Vendanges + 10 jours | Stade S_5 + 10 jours |

TABLE 2 – Liste des stades phénologiques calculés

pose, comme données d’entrée, de données climatiques : partir des données de température, il simule la phénologie de la plante étudiée. Grâce aux données météorologiques fournies par la base de données SAFRAN, le modèle est capable de simuler la date d’apparition de chaque stade phénologique, comme illustré dans le tableau 2.

En outre, à ces six stades s’ajoutent des stades intermédiaires calculés autour des stades S2 à S5. Chaque nouveau stade est obtenu en ajoutant ou soustrayant 10 jours à son stade de référence. L’objectif de cette opération est de pouvoir analyser un indicateur centré sur ces stades de référence. En effet, le modèle calcule la phénologie *entre deux stades*, aussi sans ces stades secondaires on est incapable de centrer un indicateur sur un stade en particulier.

Ainsi, les phases 7, 9, 11, 13 correspondent respectivement au débourrement, à la floraison, à la véraison et à la maturité (véraison + 35 jours). Les phases 6, 8, 10 et 12 n’ont, elles, pas de réel sens écophysiological. On peut cependant y voir le coeur d’une phase.

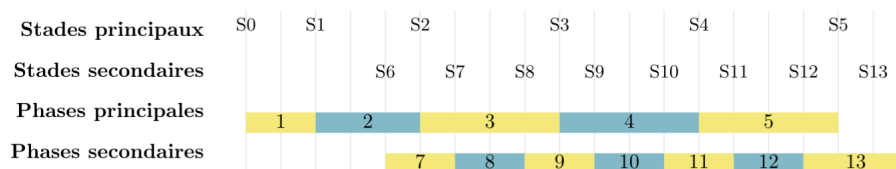


FIGURE 5 – Calendrier phénologique utilisé

Ces phases sont résumées dans la figure 5

2.4.3 Simplifications et hypothèses fortes

Comme tout travail de modélisation et d'abstraction, celui-ci comporte des simplifications et des hypothèses fortes qu'il convient de rappeler et de garder présentes à l'esprit.

La principale simplification opérée ici consiste à la division du territoire étudié en mailles de $8\text{km} \times 8\text{km}$. Cette étape, on l'a vu, est nécessaire (i) pour rendre les données intelligibles et exploitables, et (ii) pour des raisons de disponibilité de données. Les conséquences de cette simplification sont présentées ci-après.

Simplification du climat Le climat a été, pour les besoins de l'étude, considéré comme constant sur des mailles de 64km^2 , ce qui correspond évidemment à une simplification de la réalité.

Simplification du sol Le modèle nécessite des données pédologiques pour réaliser un bilan hydrique. Plutôt que renseigner exactement le type de sol indiqué par la base de données Corine-Land-Cover, nous avons simulé des sols. En effet, Corine-Land-Cover indique un type de sol représentatif de toute la surface d'une maille, soit 64km^2 , ce qui ne représente pas forcément la réalité des sols viticoles. A la place, nous avons simulé le bilan hydrique avec trois sols de réserve utile différente : 73mm, 150mm et 226mm. Les sols utilisés sont ceux du projet climator [Page et al., 2016].

Prise en compte du mode de conduite de la vigne La manière dont chaque vigneron conduit son exploitation a une influence déterminante sur le rendement. Par exemple, on observe des différences importantes entre les vins bénéficiant d'une IGP et les autres. De plus, les pratiques culturales comme le remplacement des pieds morts au sein d'une parcelle peuvent changer les valeurs de rendement. On ici considéré ces pratiques comme lissées par l'étendue des surfaces considérées.

Choix d'un cépage Le vignoble de la vallée du Rhône comporte de nombreux cépages, dont les plus importants à la fois en termes de volumes produits et de surfaces plantées sont la Syrah et le Grenache. Les deux cépages ont une phénologie similaire, aussi n'avons nous étudié que la Syrah.

2.5 Données utilisées

2.5.1 Bases de données rendement

Pour étudier l'évolution du rendement au cours du temps, plusieurs sources ont été utilisées, afin de pouvoir obtenir une évolution à de multiples échelles (AOC, département, commune, exploitation, parcelle). Dans cette perspective, quatre bases de données ont été réunies, dont les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau 3.

| Nom | Echelle | Année de départ | Période |
|-------------|------------------------|-----------------|---------|
| BD_syndicat | AOC | 1999 | 18 ans |
| BD_Agrete | Departement | 1974 | 40 ans |
| BD_cave | Exploitation, parcelle | 1992 | 25 ans |
| BD_CA | Parcelle | 1999 | 27 ans |

TABLE 3 – Liste des bases de données de rendement (hL/ha)

2.5.2 Climat - base de données SAFRAN

Là encore, les données retenues font l'objet d'une sélection en fonction :

- De la disponibilité des données recherchées
- De la résolution voulue
- De la profondeur historique disponible

Au regard de ces contraintes, les données utilisées sont issues de la base SAFRAN de Météo-France, qui ont une résolution suffisante (ce sont des carrés de 8 km de côté) et sont ininterrompues depuis 1956. Pour chaque maille, la base de donnée comporte, chaque jour, les données suivantes [LeMoigne, 2002] :

- Températures minimale, maximale et moyenne (C)
- Précipitations (mm)
- Humidité (%)
- Rayonnement (W/m^2)
- Vitesse du vent (m/s)

Ces valeurs ont l'avantage d'être issues de données observées, grâce à l'ensemble des stations de Météo-France, ce qui les rend d'autant plus fiables.

Une fois ce cadre spatio-temporel clairement établi et défini, il devient possible de conceptualiser le traitement statistique de l'évolution des rendements sur la zone étudiée et les indicateurs utilisés pour caractériser l'évolution du climat.

2.6 Traitement statistique

2.6.1 Évolution et corrélation

Pour juger d'une évolution d'un indicateur ou d'un rendement au cours du temps, nous avons utilisé un modèle linéaire simple :

$$I_{i,n} = \mu_i + \alpha_i n + \epsilon_{i,n}$$

$$\text{Avec } \left\{ \begin{array}{l} I_{i,n} : \text{Valeur de l'indicateur } i \text{ pour l'année } n \\ \mu_i : \text{Valeur moyenne de l'indicateur } i \\ \alpha_i : \text{Tendance de l'indicateur } i \\ n : \text{temps, en année} \\ \epsilon_{i,n} : \text{Bruit Gaussien} \end{array} \right.$$

La corrélation entre les indicateurs et le rendement a été calculée par la corrélation de Pearson.

2.6.2 Tests de rupture de pente

La validité d'une rupture dans la pente des rendements a été mesurée à l'aide des tests décrits par Chow (1960).

2.6.3 Variabilité des stades phénologiques

Pour confirmer la diminution de la variabilité géographique des dates d'apparition de stades phénologiques, nous avons étudié l'évolution de l'écart-type autour de la date moyenne d'apparition de ces stades dans l'ensemble de la zone, qui est défini comme suit :

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{P-1} \sum_{i=1}^P (x_{i,n} - \bar{x})^2}$$

$$\text{Avec} \left\{ \begin{array}{l} \sigma_n : \text{Écart-type} \\ n : \text{Année considérée} \\ P = 92 : \text{Nombre de mailles considérées} \\ x_{i,n} : \text{Date d'apparition } x \text{ du stade considéré pour la maille } i \text{ et l'année } n \\ \bar{x} : \text{Date moyenne d'apparition sur l'ensemble de la zone} \end{array} \right.$$

Bien que la variance et l'écart-type présentent des évolutions similaires, nous avons préféré ce dernier car il est homogène à la variable étudiée.

2.6.4 Regroupement des variables

L'étude de la phénologie nous a conduit à regrouper les différentes mailles en groupes de précocité homogène. Pour ce faire, nous avons réalisé une classification ascendante hiérarchique, à l'aide de la méthode dite "*des k-means*".

Le principe est de créer des groupes tels que la distance entre les individus soit minimale au sein d'un groupe, et la distance entre deux groupes maximale. Cela nous assure d'avoir des groupes homogènes, et différents deux à deux.

3 Résultats et discussion

3.1 Evolution des rendements

3.1.1 Remarques générales

Les bases de données utilisées étaient très hétéroclites en termes de précision et d'échelles. Cela nous a permis de constater une baisse des rendements à tous les niveaux.

3.1.2 A l'échelle des Côtes-du-Rhône

La base de données *BD_syndicat*, à l'échelle des Côtes-du-Rhône, permet de rendre compte des variations du rendement à l'échelle de tout le vignoble des Côtes-du-Rhône. On y constate que sur la période 1999 - 2017, le vignoble a enregistré une baisse moyenne de 8,28 hL/ha, soit 16,65 % en 18 ans ($p_{val} = 0,0224$). Les vendanges 2017 illustrent parfaitement cette baisse en ce sens que les rendements ont plafonné à 39 hL/ha, quand l'appellation autorisait des rendements de 51 hL/ha [Danel, 2009]. Cette base de données montre également que cette tendance à la baisse n'est pas générale : en effet, sur 16 villages étudiés, 7 n'enregistrent pas de variation significative de leur rendement. Ainsi, certaines zones géographiques semblent épargnées par la baisse.

3.1.3 A l'échelle du département

Les données nationales, fournies par Agreste, confirment cette spatialisation de l'évolution des rendements (figure 6). On distingue deux tendances : alors que la Drôme et le Vaucluse ont des rendements similaires, le Gard montre des rendements bien plus importants, ce qui s'explique par la faible proportion de ses vignes en Appellation d'Origine Protégée, traditionnellement moins productives.

Dans la Drôme et le Vaucluse, les rendements sont comparables en 1974 et en 2015. Mais en étudiant les ruptures de pente, et en traçant une courbe plus ajustée aux points, on constate qu'il y a en réalité, dans chaque département, deux périodes distinctes : les rendements ont crû jusqu'en 1990, puis régulièrement diminué jusqu'à nos jours.

Ainsi, sur la période décrite par la base de données du syndicat, *i.e.* 1999-2017, on note que la Drôme enregistre une baisse significative du rendement ($p_{val} < 2\%$) de 23,72 %.

Le test de rupture de pente [Chow, 1960] situe le maximum de production en 1991 dans le Vaucluse, 1992 dans la Drôme, et 1983 dans le Gard.

3.1.4 A l'échelle d'une exploitation agricole

Nous avons cherché à caractériser le même phénomène à une échelle plus locale. Pour ce faire, deux bases de données ont été utilisées : *BD_CA*, qui est tirée d'une exploitation agricole, et *BD_cave*, qui présente la situation d'une cave coopérative du Vaucluse. Là encore, le même phénomène est mis en évidence,

cette cave perdant 30 % de rendement entre 1999 et 2014 ($p_{val} = 10^{-4}$). Nous avons observé le même phénomène dans les jeux de données issus d'exploitations agricoles. Toutefois, les résultats locaux sont difficiles à interpréter. En effet, il ne faut pas perdre de vue que l'âge des vignes joue un rôle non négligeable dans la production viticole : une parcelle plantée met entre 5 et 7 ans avant d'atteindre sa production maximale, et les vieilles vignes tendent à devenir moins productive. Il faut en outre tenir compte du fait que chaque vigneron a une gestion différente de ses terres : l'un remplacera immédiatement chaque cep mort ou improductif quand l'autre attendra de renouveler l'ensemble de sa parcelle.

Ainsi, il apparaît que :

1. La tendance de baisse des rendements observée sur le terrain est bien vérifiée statistiquement.
2. Cette baisse de rendement est vérifiable à toutes les échelles .
3. On note cependant des disparités géographiques.

Pour comprendre un effet éventuel du climat sur les rendements, il convient d'abord d'en étudier l'évolution.

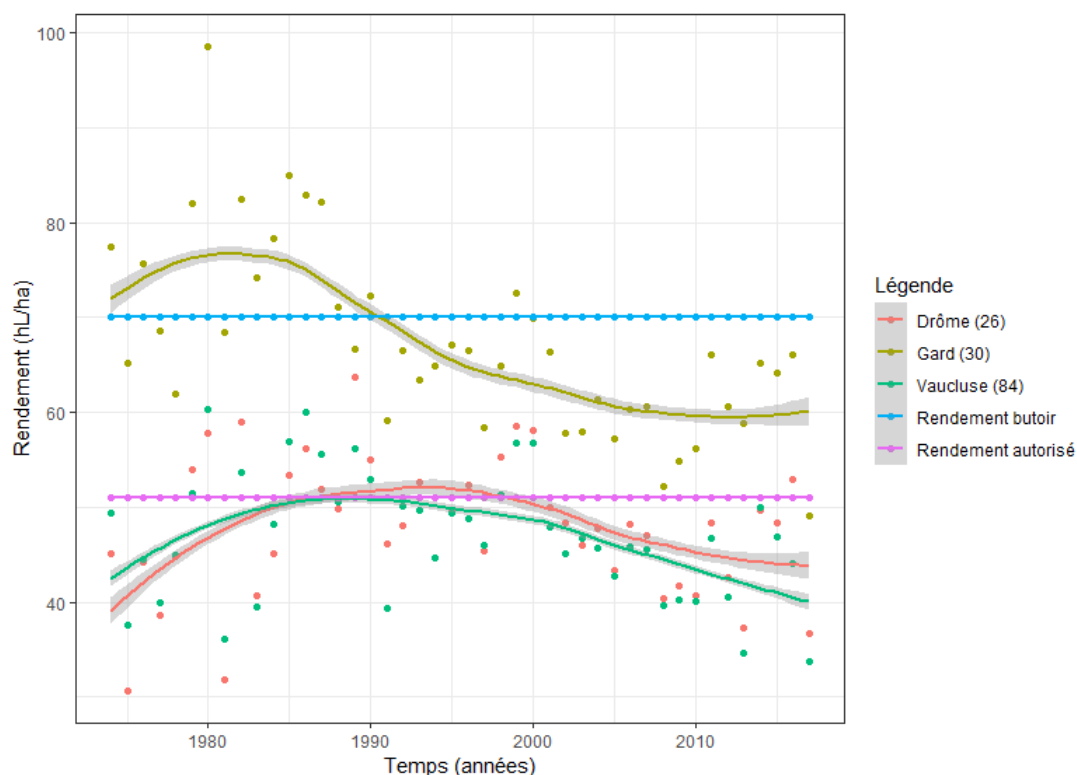


FIGURE 6 – Evolution du rendement viticole dans trois départements de la vallée du Rhône

| Stade | Pente | P-value | Variation sur 40 ans (jours) |
|-------|-------|----------------|------------------------------|
| S1 | 0,2 | 0,2 (NS à 5%) | 8 |
| S2 | -0,2 | 0,32 (NS à 5%) | -8 |
| S3 | -0,31 | 5,00E-07 | -12,4 |
| S4 | -0,33 | 5,10E-08 | -13,2 |
| S5 | -0,33 | 5,40E-08 | -13,2 |

TABLE 4 – Variation de la phénologie pour les 5 stades étudiés

3.2 Évolution de la phénologie

3.2.1 Evolution de la phénologie dans le sens de la précocité

Nous avons d’abord représenté tous les stades phénologiques simulés sur un même graphe, représenté en figure 7.

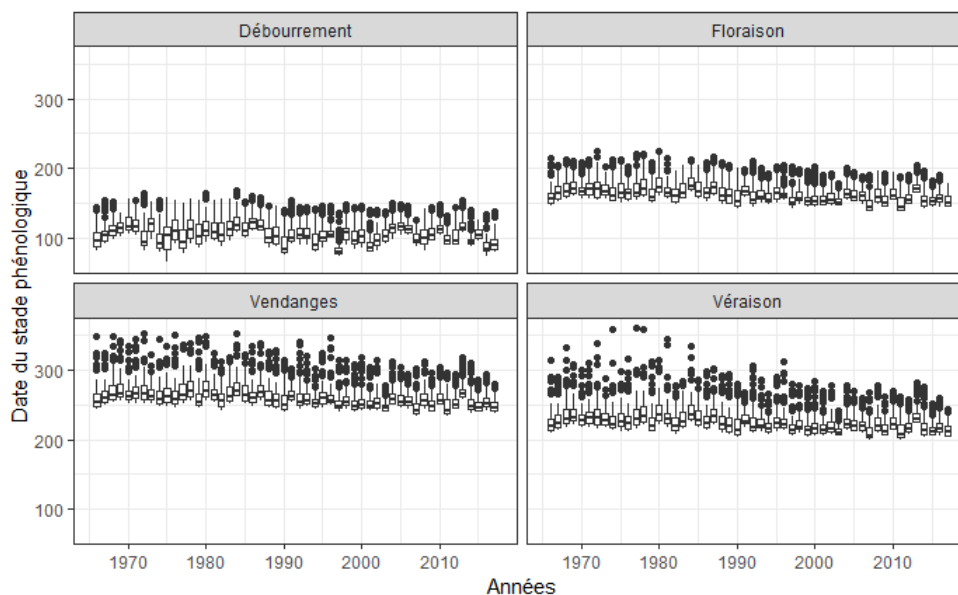


FIGURE 7 – *Boxplots* des dates d’apparition de quatre stades phénologiques.

Les ordonnées sont exprimées en jours juliens par rapport au premier janvier de l’année n (année des vendanges). Ainsi, dans la légende, 0 correspond au 1er janvier de l’année n , 365 au 31 décembre de la même année.

Visuellement, on peut constater que la date de débourrement semble peu changer. En revanche, les autres stades semblent évoluer dans le sens (i) d’une plus grande précocité et (ii) d’une variabilité géographique moindre. Cette tendance est d’autant plus visible sur la figure 8, qui se concentre sur le seul stade de la floraison.

L’observation graphique d’une tendance à la précocité est significative au seuil 5%, comme indiqué dans le tableau 4.

Un traitement statistique des données montre que les dates de vendanges et de véraison ont gagné en moyenne deux semaines par rapport aux années 1970,

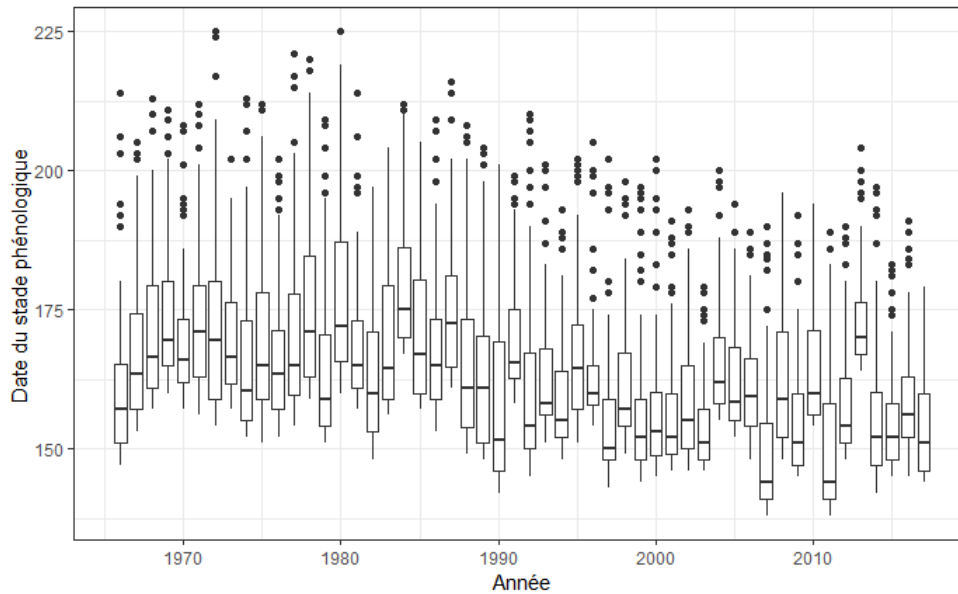


FIGURE 8 – *Boxplots* des dates de floraison pour l’ensemble des mailles étudiées (1966-2017).

ce qui est en accord avec la bibliographie [Page et al., 2016].

Cette tendance est-elle observée de manière homogène dans toute la zone d’étude ?

3.2.2 Tendances à l’uniformisation du territoire

Afin de répondre à cette question, nous avons étudié l’écart-type par rapport à la date moyenne d’apparition d’un stade phénologique sur l’ensemble du territoire étudié. Cette démarche est illustrée par la figure 9.

On constate une diminution significative de l’écart-type ($p - val < 10^{-5}$), et ce pour les quatre phases d’intérêt considérées (débourrement, floraison, véraison, vendanges). Il y a donc un tassement manifeste de la variabilité au sein d’une même zone avec une même variété (ici, il s’agit uniquement de la syrah).

Ainsi, la phénologie va donc bien dans le sens de la précocité *et* de l’uniformisation.

En plus de cette tendance, l’observation graphique suggère enfin que, quel que soit le stade phénologique considéré, les mailles sont toujours ou précoces, ou tardives : un zonage semble apparaître (figure 15 en annexe).

3.2.3 Réalisation d’un zonage géographique en fonction de la précocité

Les mailles suggérant, à première vue, une répartition géographique de la précocité, nous avons cherché à les regrouper en groupes cohérents, à l’aide d’une classification hiérarchique ascendante. Cette opération nous conduit à distinguer trois groupes, pour les quatre stades phénologiques étudiés.

Nous avons illustré sur une carte (figure 10) les différentes zones ainsi définies :

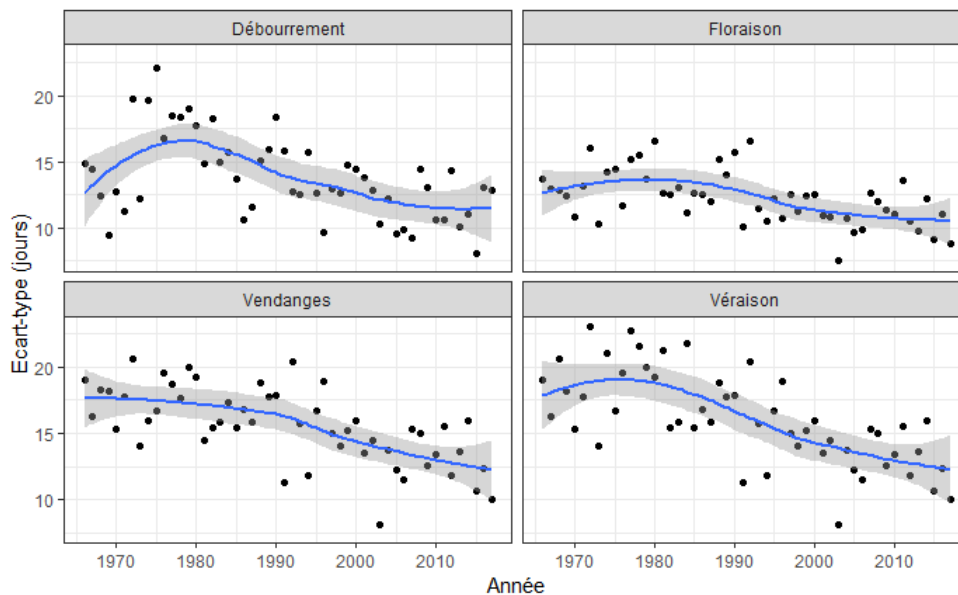


FIGURE 9 – Evolution de l'écart-type autour de la date d'apparition de quatre stades phénologiques au cours du temps

Cette répartition en trois groupes est valide pour les trois stades les plus importants (floraison, véraison, récolte). De plus, la comparaison deux à deux des groupes montre que celle-ci varie très peu : les groupes sont homogènes au cours d'une même saison.

On note que les zones les plus tardives sont peu ou prou celles où l'altitude est la plus élevée. Pour s'en convaincre, la figure 11 illustre la division de la zone d'étude en classes d'altitude.

Pour autant, on ne peut pas en tirer de conclusions robustes, pour des raisons qui seront développées lors de la discussion.

3.3 Conclusion sur la phénologie

Deux résultats principaux découlent de la présente étude :

1. D'une part, la phénologie de la vigne est de plus en plus précoce, ce qui confirme les observations déjà observées dans la littérature [de Cortazar-Atauri et al., 2017, Page et al., 2016, Mosedale et al., 2002] et sur le terrain par les viticulteurs.
2. D'autre part, la phénologie est de moins en moins variable au sein de la zone d'étude considérée.

Cette dernière conclusion peut rendre la gestion d'un parcellaire éclaté plus complexe : en effet, des parcelles à précocité différentes facilitent la gestion des opérations techniques – et en particulier les vendanges – en lissant les pics de travail. En revanche, la classification du territoire en zones de précocité peut être un outil pour les décideurs afin d'anticiper ces pics de travail.

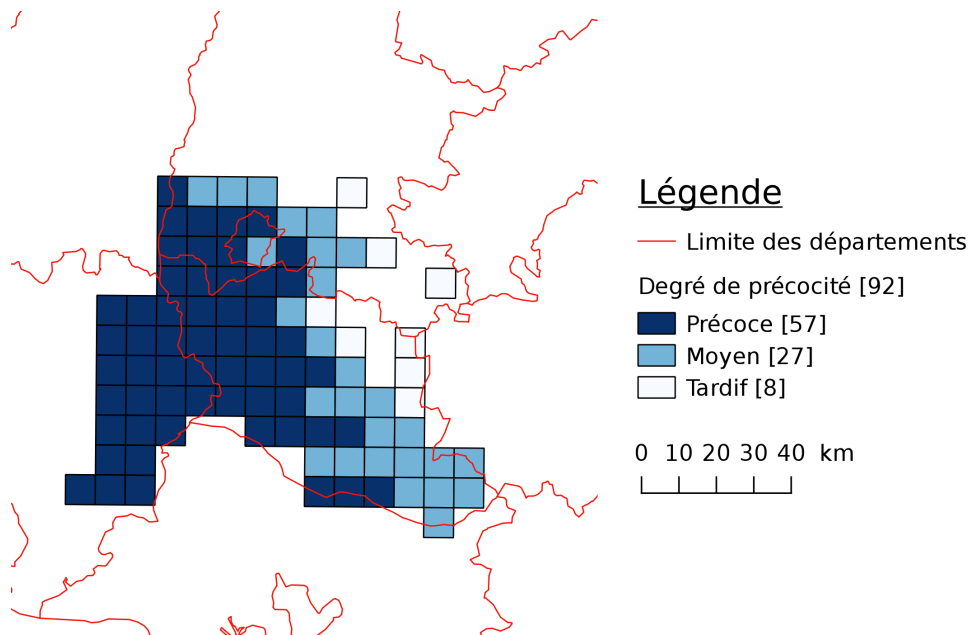


FIGURE 10 – Séparation de la zone d’étude en trois clusters de précocité pour la date de floraison

3.4 Évolution du climat

Comment peut-on caractériser l’évolution du climat de la zone étudiée grâce aux indicateurs ? Nous avons utilisé la médiane départementale de chaque indicateur pour étudier son évolution. Cela nous conduit à avoir des indicateurs ayant évolué de manière différente dans les départements.

3.4.1 Tendances générales, tendances particulières

Sur les 36 indicateurs calculés dans 3 départements et pour 13 phases différentes (soit 1404 triplets (*indicateur, phase, département*)), 240 ont évolué de manière significative. Leur liste est donnée en annexe. Les indicateurs ayant significativement évolué dans les trois départements reflètent l’évolution générale de la zone d’étude, tandis que les indicateurs uniques reflètent une évolution particulière d’un département.

Sur l’ensemble des indicateurs, 60 concernent trois départements, 15 deux départements et 30 un seul département.

Le tableau 5 donne l’exemple de 8 couples (*indicateur, phase*) dont l’évolution est particulièrement importante au cours de la période étudiée et dans les trois départements.

Tendances générales Les variables ayant le plus évolué sont les variables liées à la température et au stress hydrique : elles représentent entre 30% et 38% du nombre total d’indicateurs ayant évolué dans les trois départements. Leur étude montre que la région est marquée par des températures croissantes

| Indicateur | Phase | Département | Variation |
|------------------------|-------|-------------|-----------|
| HEAT.DAYS | 4 | 30 | 13,20 |
| HEAT.DAYS | 5 | 30 | 12,46 |
| HEAT.DAYS | 4 | 84 | 12,42 |
| HEAT.DAYS | 4 | 26 | 10,32 |
| HEAT.DAYS | 5 | 84 | 10,12 |
| HEAT.DAYS | 5 | 26 | 7,78 |
| RADIATION.AVERAGE | 5 | 26 | 442 |
| RADIATION.AVERAGE | 5 | 84 | 377 |
| RADIATION.AVERAGE | 5 | 30 | 230 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 26 | 24,3 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 84 | 24,2 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 30 | 24 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 26 | 24,3 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 84 | 24,2 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 30 | 24 |
| T.MAX | 12 | 26 | 5,94 |
| T.MAX | 12 | 84 | 5,94 |
| T.MAX | 12 | 30 | 5,63 |
| T.MIN | 11 | 26 | 5,64 |
| T.MIN | 11 | 84 | 4,40 |
| T.MIN | 11 | 30 | 2,70 |
| T.MAX | 11 | 26 | 5,80 |
| T.MAX | 11 | 84 | 4,43 |
| T.MAX | 11 | 30 | 3,31 |

TABLE 5 – Quelques indicateurs ayant évolué et leur variation totale entre 1974 et 2014 en Drôme, Gard et Vaucluse.

Les jours de chaleur (HEAT.DAYS) et les jours de stress hydrique (WATERSTRESS.DAYS) sont donnés en nombre de jours, le rayonnement moyen (RADIATION.AVERAGE) en W/m^2 , et les Températures (T.MIN, T.MAX) en degrés Celsius.

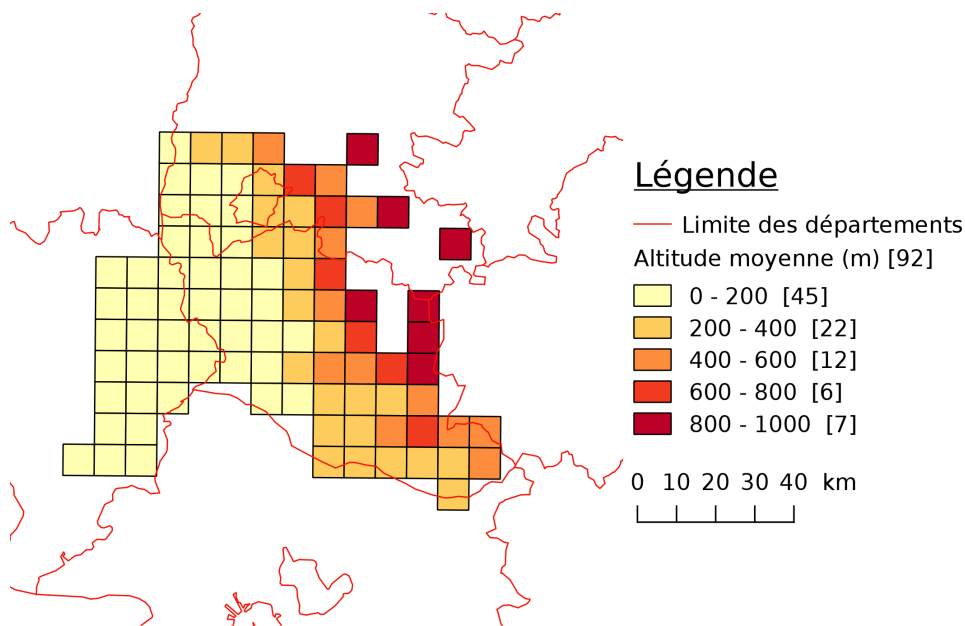


FIGURE 11 – Séparation de la zone d'étude en trois clusters de précocité pour la date de floraison

lors des phases phénologiques tardives (jusqu'à 6°C d'augmentation) et un stress hydrique également croissant sur les sols peu ou moyennement profonds.

Tendances particulières Les indicateurs ayant évolué seulement dans deux départements sont ceux qui concernent la pluie et le rayonnement. Les premiers ont varié quasi-exclusivement en Drôme et Vaucluse. Le Gard, lui, semble peu affecté par les variations de pluviométrie.

Enfin, le rayonnement a augmenté dans les trois départements, spécifiquement lors des phases 5 et 12, soit au beau milieu de l'été.

Quant aux paramètres ayant évolué dans un seul département, on note trois évolutions distinctes : dans la Drôme et le Vaucluse, la pluviométrie a augmenté de manière significative, quoique faible. Dans le Gard, ce sont les paramètres de température, et particulièrement l'amplitude thermique, qui ont évolué

3.4.2 Evolution des indicateurs de température

L'ensemble des départements a enregistré une hausse importante à la fois des températures minimales et maximales lors des phases de fin de cycle (véraison - vendanges) : la hausse est comprise entre trois degrés et six degrés Celsius (tableau 5, figure 13).

On peut expliquer cette augmentation des températures *lors des dernières phases* pour partie par une augmentation générale de la température, mais également par la précocité des phases en question (tableau 4). En effet, il n'était pas rare dans les années 1970 que la véraison ait lieu à la mi-août, et les vendanges en octobre, tandis que ces mêmes stades ont lieu 15 jours plus tôt aujourd'hui. Or les

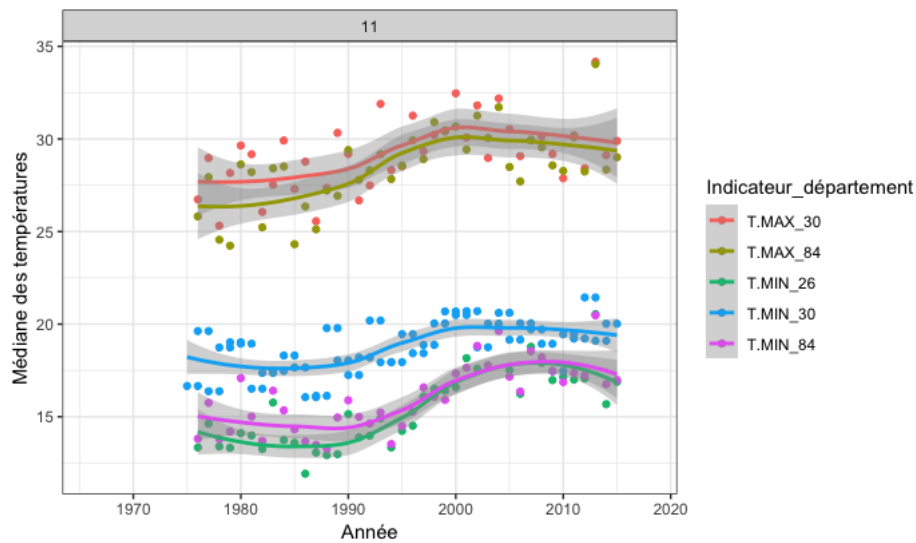


FIGURE 12 – Évolution des températures minimales et maximales autour de la véraison pour trois départements

températures sont plus chaudes au mois de juillet, donc une phase phénologique ayant lieu plus tôt enregistre nécessairement des températures plus élevées. Toutefois, la précocité étant liée à la température, cela signifie *a minima* que celle-ci a augmenté dans les premières phases de développement.

Contrairement aux températures maximales et minimales, l'amplitude thermique semble n'avoir varié que dans le Gard, où elle a gagné entre 1 et 2 degrés sur l'ensemble de la saison (débourrement – vendanges). Ce département a également vu la température maximale augmenter de 2 degrés entre débourrement et floraison. Une absence générale d'augmentation de l'amplitude thermique n'est pas étonnante : si les températures minimales *et* maximales augmentent de manière comparable l'amplitude, définie comme leur différence, ne varie que très peu.

3.4.3 Evolution des indicateurs hydriques

L'étude des indicateurs reliés à l'état hydrique de la plante montre d'abord une augmentation du stress hydrique dans l'ensemble de la région : une parcelle de réserve utile faible, quel que soit le département considéré, passe entre floraison et véraison 24 jours de plus en situation de stress hydrique en 2017 qu'en 1974 (tableau 5). Il s'agit apparemment d'un paradoxe, puisque dans le même temps le déficit hydrique semble avoir diminué (figure 22 en annexe). L'explication se trouve dans la répartition de la pluie : le cumul des précipitations a augmenté, et le nombre de jours pluvieux également, mais ce dernier n'a augmenté que très faiblement : de l'ordre de deux journées supplémentaires sur une phase (figure 17 en annexe). Ainsi, il y a davantage de pluie, mais trop regroupée pour compenser sur l'ensemble d'une phase les effets des hausses de température et de rayonnement.

On comprend donc que l'on assiste à une modification du climat dans le sens du réchauffement, ce qui est conforme aux attentes [GIEC, 2014, Page et al., 2016].

3.4.4 Évolution des paramètres radiatifs

Le rayonnement s'est intensifié dans toute de la région et sur l'ensemble de la saison : le rayonnement moyen est plus important lors des phases 2 et 5, c'est à dire lors de la dormance et dans les 35 jours suivant la véraison (figure 19). L'activité biologique de la vigne étant sinon nulle, du moins fortement diminuée lors de la dormance, c'est le second résultat qui retient notre attention : la région bénéficie d'un plus fort ensoleillement à une période où, théoriquement, les grains se remplissent, ce qui semblerait jouer en faveur de rendements plus importants.

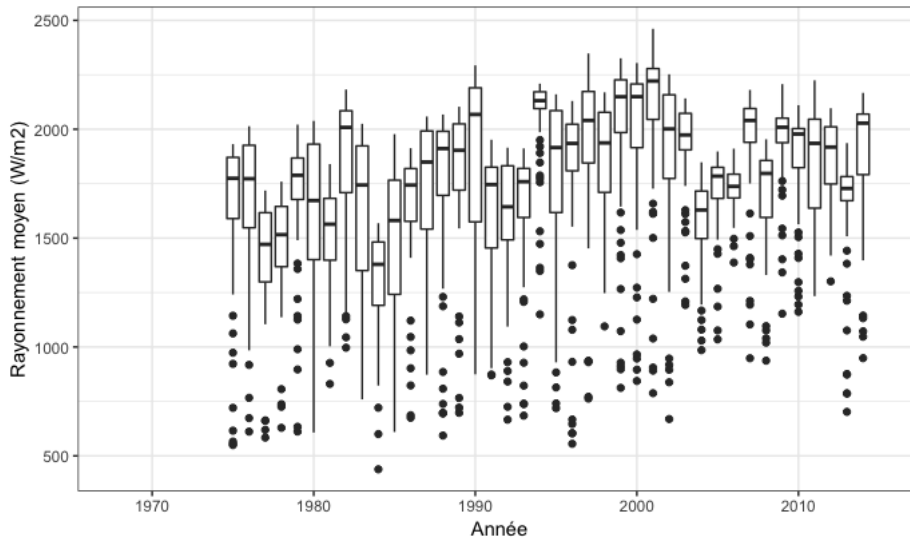


FIGURE 13 – Évolution du rayonnement moyen sur l'ensemble du territoire

Ce résultat est conforme aux attentes de la littérature [Page et al., 2016]. D'un point de vue pratique, l'augmentation du rayonnement et de la température pourrait conduire à l'abandon de pratiques telles que l'effeuillage pour continuer la culture de la vigne.

3.5 Lien entre climat et rendement

À partir des données (i) d'évolution des indicateurs climatiques et (ii) des données d'évolution du rendement, nous avons cherché un lien éventuel entre les deux. Pour ce faire, nous avons étudié la corrélation entre le rendement de chaque département d'une part, et la médiane de l'indicateur étudié sur toutes les mailles appartenant à ce département. Les indicateurs sélectionnés ont été ceux qui ont évolué de façon significative.

3.5.1 Corrélation

La première tentative de corrélation des indicateurs avec le rendement a conduit à un tableau un peu grossier, comportant de nombreux indicateurs redondants.

3.5.2 Tri des variables corrélées

Seuls les indicateurs significatifs au seuil 5%. Parmi tous les indicateurs sélectionnés, certains étaient des doublons, ou strictement proportionnels. La sélection entre deux indicateurs semblables a été opérée avec les critères suivants :

- P-value la plus importante
- Corrélation la plus importante en valeur absolue
- En l'absence de critère nettement discriminant, l'aspect pratique prévaut : un nombre de jour entre deux stades est plus facile à calculer qu'une fréquence.

Après écrémage, il reste en tout 40 indicateurs corrélés au rendement, dont la liste est donnée en figure 14 (annexe 1).

3.5.3 Typologie des indicateurs corrélés au rendement

Parmi les 40 indicateurs conservés, on note une forte influence de l'année précédente : 29 concernent la saison $n - 1$, et seulement 11 concernent l'année n . De plus, si l'on prend les 20 indicateurs les plus corrélés, la proportion d'indicateurs concernant l'année $n - 1$ atteint 90%. Si le rendement viticole est élaboré sur deux ans, l'influence de l'année $n - 1$ n'est d'ordinaire pas aussi prépondérante [Molitor and Keller, 2016, Romero et al., 2016]. On note également que la plupart des indicateurs sélectionnés sont corrélés négativement avec le climat (36 sur 40). Les indicateurs positivement corrélés au climat sont tous des indicateurs de l'année $n - 1$, et concernent tous une variable hydrique du climat.

L'immense majorité des indicateurs corrélés au rendement concerne la température (75%) et l'état hydrique (23%). Un seul le rayonnement. On obtient donc un résultat assez classique, qui est que les paramètres les plus influents sur la vigne sont la température et l'état hydrique [Page et al., 2016, Romero et al., 2016].

En ce qui concerne les phases concernées, alors que la littérature évoque une prépondérance de l'état hydrique et thermique de la vigne lors de la floraison de l'année $n - 1$ [Petrie and Clingeleffer, 2005, Vasconcelos et al., 2009, Romero et al., 2016], les résultats obtenus tendent à donner davantage d'importance aux phases plus tardives, c'est à dire après la véraison.

| Département | Indicateur | Phase | Corrélation | Saison |
|-------------|------------------------|-------|-------------|--------|
| 30 | T.AMP | 3 | -0,46 | n |
| | T.AMP | 5 | -0,5 | n-1 |
| | T.MAX | 12 | -0,6 | n-1 |
| 26 | WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 5 | 0,32 | n-1 |
| | T.MIN | 1 | -0,37 | n |
| | HEAT.DAYS | 3 | -0,43 | n-1 |
| 84 | T.MIN | 4 | -0,35 | n-1 |
| | T.MIN | 12 | -0,38 | n-1 |
| | T.MAX | 12 | -0,42 | n-1 |

TABLE 6 – Indicateurs les plus corrélés au rendement pour chaque département

4 Limites et perspectives

Cette étude a conduit à mieux appréhender l'évolution du vignoble des Côtes-du-Rhône méridionales. Cependant, on peut soulever quelques remarques sur la manière dont on pourrait l'approfondir et la poursuivre.

4.1 Limites

4.1.1 Problème de résolution

La limite la plus évidente est celle de la résolution des données. L'astuce statistique consistant à prendre la médiane des indicateurs considérés et d'en analyser le lien avec le rendement permet certes de tirer des conclusions, mais souffre d'un manque d'adéquation entre les données climatiques, d'une précision de $64km^2$ vis à vis des données de rendement, dont la précision n'excède pas $3000km^2$. On pourrait gagner en précision sur le rôle des indicateurs notamment en utilisant les rendements de chaque commune, dont la surface est du même ordre de grandeur que les mailles SAFRAN. Ceci permettrait de comprendre l'influence du mésoclimat sur le rendement.

4.1.2 Choix de la zone

On a remarqué plus haut que la division de la zone d'étude en trois régions de précocité homogène avait fait la part belle aux vignes du Gard. Cela soulève la question de la pertinence de la zone d'étude choisie au départ. La règle de décision, pour n'omettre aucune maille, était de sélectionner toutes les mailles comportant au moins un cep de vigne. Etant donné que le poids de chaque maille n'était pas pondéré par la surface plantée en vigne, cela revient à avoir donné le même poids aux mailles du cœur de la vallée du Rhône, couvertes à 70% de vignes, qu'aux mailles en bordure du mont Ventoux, qui ne sont présentes que par le simple fait qu'il existe des vignes dans les parties les plus basses. L'analyse gagnerait peut-être en précision et en pertinence si l'on réalisait cette pondération. Une autre solution, plus radicale, consiste à ne pas sélectionner les mailles comportant moins de 10 % de vignes.

4.2 Perspectives

4.2.1 Evolution de la pression en maladies

La vigne est une culture très sensible aux maladies. Les plus emblématiques sont l'oïdium et le mildiou. Ces maladies ont un contexte de développement très particulier, qui dépend de facteurs climatiques précis. L'utilisation d'indicateurs peut contribuer à mieux connaître leur développement et anticiper la lutte. La méthode *window pane analysis*, qui utilise de tels indicateurs a ainsi été utilisée à cette fin par Kriss *et al.* [2010].

4.2.2 Les apports de l'écophysiologie

Les résultats obtenus pourront être avantageusement analysés au travers du prisme de l'écophysiologie, afin de déterminer pour chaque indicateur corrélé au rendement sur quel paramètre physiologique il influe, et obtenir ainsi une compréhension biologique des mécanismes mis en œuvre. Cela permettrait en outre de déterminer sur quelle composante du rendement ledit événement climatique joue un rôle.

4.2.3 Les apports de l'informatique

La puissance de calcul qui nous est offerte aujourd'hui permet d'envisager de nombreuses possibilités. En particulier, l'apprentissage automatique peut apporter une grande plus-value à ce travail, en permettant de sélectionner les indicateurs les plus pertinents pour prédire le rendement. Les indicateurs écoclimatiques permettent parfois d'obtenir une grande performance dans la prédiction du rendement [Molitor and Keller, 2016]. Bien entendu, une grande incertitude demeure, ne serait-ce que dans la validité de l'utilisation de la tendance des années passées comme tendance de l'avenir.

Conclusion

L'inquiétude des vignerons des Côtes-du-Rhône est justifiée : le changement climatique, autrefois débattu, discuté, et pour ainsi dire incertain, est aujourd'hui une réalité qui se fait déjà sentir. L'utilisation d'indicateurs éco-climatiques a permis de mettre en évidence une augmentation sensible de la précocité des vignes, jusqu'à deux semaines d'avance en 40 ans. Cette tendance devrait se poursuivre, avec les conséquences néfastes que l'on sait. En outre, le constat empirique de la baisse des rendements est bien vérifié à toutes les échelles, et ce sur des séries suffisamment longues pour dresser un tableau cohérent de l'évolution des rendements. Ceux-ci ont augmenté entre les années 1970 et 1990. Cette baisse des rendements s'est accompagnée par une modification du climat, notamment en ce qui concerne les paramètres thermiques et hydriques. Une analyse de corrélation a pu montrer un lien entre l'évolution de certains indicateurs avec le rendement observé. C'est pourquoi les viticulteurs devront trouver des stratégies d'adaptation pour continuer leur activité. Parmi les pistes proposées, l'abandon de l'effeuillage, l'irrigation et l'adaptation des portes-greffes sont prometteuses.

Ce travail pourra être prolongé en analysant les résultats obtenus à travers le prisme de l'écophysiologie. De plus, les méthodes informatiques disponibles peuvent faire espérer une utilisation des indicateurs pour servir de base à un modèle de prédiction du rendement. Sa précision ne semble pas pour l'instant devoir révolutionner les prévisions de rendement, mais peut informer sur les tendances de l'année à venir, en particulier pour les décideurs à l'échelle du vignoble. On pourra augmenter sa précision en utilisant des données de rendements plus précises qu'à l'échelle du département, et ainsi affiner les résultats.

Bibliographie

- J. Caubel, I. G. de Cortazar-Atauri, M. Launay, N. de Noblet-Ducoudré, F. H. P. Bertuzzi, and A.-I. Graux. 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, 2015.
- G. Chow. *Tests of Equality Between Sets of Coefficients in Two Linear Regressions*, volume 28. 1960.
- J.-B. Danel. Forces, faiblesses et perspectives de la viticulture du vaucluse. Technical report, Conseil général de l’agriculture, de l’alimentation et des espaces ruraux, 2009.
- I. G. de Cortazar-Atauri, E. Duchêne, A. Destrac-Irvine, G. Barbeau, L. de Reséguier, T. Lacombe, A. K. Parker, N. Saurin, and C. van Leeuwen. Grapevine phenology in France : from past observations to future evolutions in the context of climate change. *Oeno-One*, 51, 2017.
- M. Deneux. Evaluation de l’ampleur des changements climatiques, de leur cause et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l’horizon 2025, 2050 et 2100. Technical report, Sénat, 2002.
- P. Dry and B. Coombe. Viticulture, volume 1 : Ressources. second edition. *WineTitles*, Adelaide, 2004.
- A. Ebadi, P. May, and B. Coombe. Effect of short-term temperature and shading on fruit-set, seed and berry development in model vines of *V. vinifera*, cvs chardonnay and shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine research*, 2 :1–8, 1996.
- GIEC. Changements climatiques 2014 - rapport de synthèse. Technical report, 2014.
- N. Guilpart, A. Métaï, and C. Gary. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *European Journal of Agronomy*, 54 :9–20, 2014a.
- N. Guilpart, A. Métaï, and C. Gary. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *European Journal of Agriculture*, 54 :9–20, 2014b.
- A. Holzkämper, P. Calanca, and J. Fuhrer. Identifying climatic limitations to grain maize yield potentials using a suitability evaluation approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168 :149–159, 2013.
- M. Keller, J. Tamara, and L. Mills. Spring temperatures alter reproductive development in grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine research*, 16 : 445–454, 2010.

- I. Korkutal, A. Carbonneau, and E. Bahar. Effects of early water stress levels on berry set and berry development in merlot cv. (*vitis vinifera* l.). *African Journal of Biotechnology*, 10 :15921–15932, 2011.
- A. Kriss, P. Paul, and L. Madden. Relationship between yearly fluctuations in fusarium head blight intensity and environmental variable : A window-pane analysis. *Phytopathology*, 100 :784–797, 2010.
- P. LeMoigne. Description de l’analyse des champs de surface sur la france par le système safran. Technical report, Centre national de recherches météorologiques, 2002.
- M. Milankovitch. Canon of insolation and the ice-age problem. *Special Publications of the Royal Serbian Academy*, 132, 1941.
- D. Molitor and M. Keller. Yield of müller-thurgau and riesling grapevines is altered by meteorological condition in the current and previous seasons. *Oeno One*, 50 :245–258, 2016.
- L. Monde. *En Angleterre, le réchauffement climatique fait le bonheur de la vigne*, 2013. <https://www.lemonde.fr/> [Consulté en septembre 2018].
- I. Morales-Castilla et al. Modèle de croissance de la vigne. soumis.
- J. Mosedale, K. Abernethy, R. Smart, R. Wilson, and I. Maclean. Climate change impacts and adaptative strategies : lessons from the grapevine. *Global Change Biology*, 22 :3814–3828, 2002.
- Météo-France. *Le réchauffement climatique observé à l’échelle du globe et en France*, 2018. <https://www.meteo-france.gouv.fr/> [Consulté en septembre 2018].
- ONERC. *Impact du changement climatique*, 2018. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc> [Consulté en juillet 2018].
- N. Oreskes and E. M. Conway. *Les Marchands de Doute*. Le Pommier, 2010.
- C. Page, N. Buisson, F. Levraut, L. Terray, M. Dénué, C. Flécher, F. Huard, D. Allard, P. Gate, B. Itier, J. Sierra, D. Gouache, R. Roche, P. Pieri, M.-O. Bancal, J.-L. Durand, R. Lardy, A.-I. Graux, F. Bernard, and E. Lebon. Changement climatique et culture de la vigne : l’essentiel des impacts. In *Livre vert Climator*, 2016.
- P. Petrie and P. Clingeleffer. Effects of temperature and light (before and after budburst) on inflorescence morphology and flower number of chardonnay grapevines (*vitis vinifera* l.). *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11 : 59–65, 2005.

- P. Romero, J. Fernandez-Fernandez, A. Bravo-Cantero, M. Ayala, and P. Botia. Climate influences on yield, berry and wine quality in monastrell wine grapes in a warm winegrowing region (jumilla area, se spain). *Geoinformatics and Geostatistics : an overview*, 4, 2016.
- C. van Leeuwen, H. Schultz, I. G. de Cortazar-Atauri, E. Duchêne, N. Ollat, P. Pieri, B. Bois, J.-P. Goutouly, H. Quénot, J.-M. Touzard, A. C. Malheiro, L. Bavaresco, and S. Delrota. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050.
- M. Vasconcelos, M. Greven, C. Winefield, M. Trought, and V. Raw. The flowering process of *Vitis vinifera* : a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60, 2009.

Annexe 1 - Indicateurs corrélés au rendement

| Indicateur | Département | Phase | Corrélation | P-Value | Saison |
|-----------------------------|-------------|-------|-------------|----------|--------|
| COLDTMEAN.DAYS | 26 | 1 | 0,36 | 1,69E-02 | n-1 |
| SERHEAVYRAIN.PART | 30 | 5 | 0,34 | 3,08E-02 | n-1 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 26 | 5 | 0,32 | 3,23E-02 | n-1 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 26 | 13 | 0,30 | 4,93E-02 | n-1 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 30 | 2 | -0,30 | 4,42E-02 | n |
| HEAT.DAYS | 30 | 3 | -0,31 | 3,78E-02 | n-1 |
| WATERSTRESS.FREQUENCY.soil2 | 30 | 7 | -0,32 | 3,30E-02 | n-1 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 30 | 7 | -0,32 | 3,30E-02 | n-1 |
| T.MIN | 26 | 4 | -0,33 | 3,80E-02 | n-1 |
| HEAT.DAYS | 30 | 5 | -0,33 | 2,79E-02 | n |
| HEAT.FREQUENCY | 84 | 3 | -0,33 | 2,77E-02 | n-1 |
| T.MAX | 30 | 5 | -0,33 | 3,60E-02 | n |
| T.AMP | 30 | 2 | -0,33 | 3,13E-02 | n |
| T.AMP | 30 | 12 | -0,34 | 3,32E-02 | n |
| T.MIN | 84 | 4 | -0,35 | 2,75E-02 | n-1 |
| T.MAX | 30 | 12 | -0,35 | 2,71E-02 | n |
| T.AMP | 30 | 9 | -0,35 | 2,52E-02 | n |
| HEAT.DAYS | 30 | 12 | -0,36 | 1,76E-02 | n |
| T.AMP | 30 | 9 | -0,36 | 2,38E-02 | n-1 |
| HEAT.DAYS | 30 | 1 | -0,36 | 1,66E-02 | n-1 |
| T.MIN | 26 | 1 | -0,36 | 1,84E-02 | n-1 |
| T.MIN | 26 | 1 | -0,37 | 1,57E-02 | n |
| T.MIN | 84 | 12 | -0,38 | 1,68E-02 | n-1 |
| T.MIN | 84 | 11 | -0,38 | 1,65E-02 | n-1 |
| T.MAX | 30 | 13 | -0,40 | 1,10E-02 | n-1 |
| T.AMP | 30 | 2 | -0,40 | 8,91E-03 | n-1 |
| T.MIN | 30 | 5 | -0,41 | 8,78E-03 | n |
| T.AMP | 30 | 3 | -0,42 | 7,60E-03 | n-1 |
| T.MAX | 84 | 12 | -0,42 | 6,99E-03 | n-1 |
| HEAT.DAYS | 26 | 3 | -0,43 | 3,74E-03 | n-1 |
| HEAT.DAYS | 30 | 5 | -0,45 | 2,24E-03 | n-1 |
| HEAT.DAYS | 30 | 12 | -0,46 | 1,86E-03 | n-1 |
| T.AMP | 30 | 3 | -0,46 | 2,53E-03 | n |
| RADIATION.AVERAGE | 30 | 12 | -0,48 | 1,65E-03 | n-1 |
| T.AMP | 30 | 5 | -0,50 | 1,16E-03 | n-1 |
| T.MIN | 30 | 5 | -0,55 | 2,28E-04 | n-1 |
| T.MIN | 30 | 12 | -0,56 | 1,75E-04 | n-1 |
| T.MAX | 30 | 5 | -0,56 | 1,57E-04 | n-1 |
| T.AMP | 30 | 12 | -0,58 | 1,01E-04 | n-1 |
| T.MAX | 30 | 12 | -0,60 | 4,98E-05 | n-1 |

FIGURE 14 – Liste des indicateurs étant significativement corrélés au rendement (p-val < 5%), classés par pente décroissante

Annexe 2 - Précocité et zonage géographique

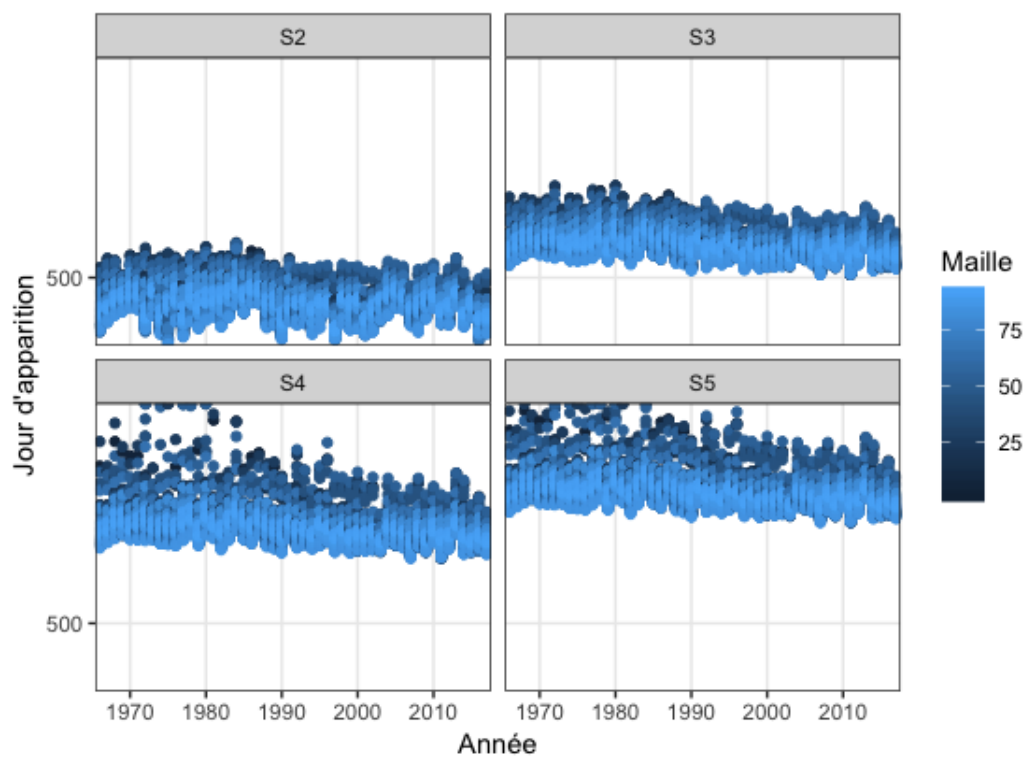


FIGURE 15 – Évolution de la précocité de quatre stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison, véraison + 35 jours) pour 92 sites

Annexe 3 - Indicateurs ayant évolué

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|--------------------|-------|-------------|-------|----------|
| HEAT.DAYS | 4 | 30 | 0,33 | 5,10E-04 |
| HEAT.DAYS | 1 | 30 | 0,32 | 3,21E-07 |
| HEAT.DAYS | 5 | 30 | 0,31 | 7,31E-06 |
| HEAT.DAYS | 4 | 84 | 0,31 | 7,50E-04 |
| HEAT.DAYS | 1 | 84 | 0,29 | 1,57E-06 |
| COLDTMEAN.DAYS | 2 | 30 | 0,29 | 1,50E-02 |
| HEAT.DAYS | 4 | 26 | 0,26 | 1,31E-03 |
| HEAT.DAYS | 5 | 84 | 0,25 | 1,28E-05 |
| HEAT.DAYS | 1 | 26 | 0,23 | 2,35E-05 |
| HEAT.DAYS | 10 | 30 | 0,22 | 2,09E-03 |
| HEAT.DAYS | 10 | 84 | 0,20 | 3,20E-03 |
| COLDTMEAN.DAYS | 1 | 84 | 0,20 | 1,06E-02 |
| HEAT.DAYS | 5 | 26 | 0,19 | 6,10E-05 |
| HEAT.DAYS | 11 | 30 | 0,19 | 1,29E-04 |
| HEAT.DAYS | 11 | 84 | 0,19 | 2,80E-05 |
| HEAT.DAYS | 10 | 26 | 0,18 | 4,17E-03 |
| COLDTMIN.FREQUENCY | 2 | 84 | 0,17 | 3,81E-02 |
| HEAT.DAYS | 12 | 30 | 0,17 | 2,06E-05 |
| COLDTMEAN.DAYS | 1 | 26 | 0,17 | 3,11E-02 |
| HEAT.DAYS | 11 | 26 | 0,15 | 2,38E-04 |
| COLDTMEAN.DAYS | 1 | 30 | 0,15 | 3,39E-02 |
| HEAT.DAYS | 12 | 84 | 0,14 | 1,67E-05 |
| HEAT.DAYS | 12 | 26 | 0,10 | 1,04E-04 |
| HEAT.DAYS | 13 | 30 | 0,09 | 1,76E-04 |
| HEAT.DAYS | 9 | 84 | 0,03 | 1,86E-02 |
| HEAT.DAYS | 13 | 84 | 0,03 | 2,10E-02 |
| HEAT.DAYS | 9 | 30 | 0,02 | 4,53E-02 |
| HEAT.DAYS | 3 | 30 | 0,02 | 2,93E-02 |
| HEAT.DAYS | 13 | 26 | 0,01 | 1,34E-02 |
| HEAT.DAYS | 3 | 84 | 0,01 | 3,14E-02 |
| HEAT.DAYS | 3 | 26 | 0,01 | 4,44E-02 |

FIGURE 16 – Liste des indicateurs de "chaleur" ayant évolué ($p\text{-val} < 5\%$), classés par pente décroissante

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|------------------------|-------|-------------|-------|----------|
| RAIN.SUM | 1 | 30 | 6,42 | 2,96E-04 |
| RAIN.SUM | 1 | 26 | 5,98 | 4,35E-04 |
| RAIN.SUM | 13 | 26 | 1,01 | 6,73E-03 |
| RAIN.DAYS | 1 | 26 | 0,26 | 8,72E-04 |
| RAIN.DAYS | 1 | 84 | 0,25 | 1,85E-04 |
| RAIN.DAYS | 1 | 30 | 0,23 | 1,72E-03 |
| RAIN.FREQUENCY | 3 | 84 | 0,13 | 3,03E-02 |
| RAIN.FREQUENCY | 8 | 84 | 0,13 | 4,84E-02 |
| RAIN.FREQUENCY | 4 | 26 | 0,09 | 4,47E-02 |
| RAIN.DAYS | 4 | 84 | 0,06 | 1,17E-02 |
| RAIN.DAYS | 10 | 26 | 0,04 | 3,94E-02 |
| RAIN.DAYS | 13 | 26 | 0,04 | 1,16E-02 |
| RAIN.DAYS | 7 | 84 | 0,04 | 9,54E-03 |
| RAIN.DAYS | 7 | 26 | 0,04 | 2,45E-02 |
| RAIN.DAYS | 10 | 84 | 0,04 | 2,80E-02 |
| SERHEAVYRAIN.DAYS | 1 | 26 | 0,03 | 9,51E-03 |
| RAIN.DAYS | 13 | 84 | 0,03 | 1,74E-02 |
| DROUGHT.SPELL | 2 | 84 | 0,03 | 3,68E-02 |
| SERHEAVYRAIN.DAYS | 1 | 84 | 0,03 | 4,88E-03 |
| DROUGHT.SPELL | 2 | 30 | 0,02 | 4,00E-02 |
| DROUGHT.SPELL | 4 | 84 | 0,02 | 5,51E-03 |
| SERHEAVYRAIN.FREQUENCY | 1 | 84 | 0,02 | 1,02E-02 |
| DROUGHT.SPELL | 9 | 84 | 0,01 | 3,59E-02 |
| SERHEAVYRAIN.DAYS | 13 | 26 | 0,01 | 3,78E-02 |
| HEAVYRAIN.PART | 10 | 84 | -0,62 | 4,61E-02 |
| SERHEAVYRAIN.PART | 5 | 30 | -0,65 | 3,50E-02 |

FIGURE 17 – Liste des indicateurs de pluviométrie ayant évolué (p-val < 5%), classés par pente décroissante

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|---------------|-------|-------------|---------|----------|
| RADIATION.SUM | 1 | 26 | 1914,94 | 5,33E-04 |
| RADIATION.SUM | 1 | 84 | 1913,21 | 8,20E-04 |
| RADIATION.SUM | 1 | 30 | 1883,25 | 1,18E-03 |
| RADIATION.SUM | 4 | 26 | 1555,65 | 4,29E-03 |
| RADIATION.SUM | 4 | 84 | 1537,66 | 5,37E-03 |
| RADIATION.SUM | 4 | 30 | 1490,30 | 6,53E-03 |
| RADIATION.SUM | 2 | 84 | 1275,80 | 4,02E-03 |
| RADIATION.SUM | 2 | 30 | 1182,29 | 9,79E-04 |
| RADIATION.SUM | 2 | 26 | 1152,12 | 1,17E-02 |
| RADIATION.SUM | 10 | 26 | 1056,29 | 6,03E-03 |
| RADIATION.SUM | 10 | 84 | 1055,73 | 6,15E-03 |
| RADIATION.SUM | 10 | 30 | 1015,58 | 7,58E-03 |
| RADIATION.SUM | 3 | 26 | 998,81 | 1,72E-02 |
| RADIATION.SUM | 3 | 84 | 926,79 | 2,83E-02 |
| RADIATION.SUM | 5 | 84 | 814,64 | 1,17E-03 |
| RADIATION.SUM | 5 | 30 | 811,67 | 2,87E-03 |
| RADIATION.SUM | 5 | 26 | 803,56 | 6,95E-04 |
| RADIATION.SUM | 8 | 26 | 624,13 | 2,66E-02 |
| RADIATION.SUM | 11 | 26 | 520,94 | 1,07E-03 |
| RADIATION.SUM | 11 | 84 | 519,66 | 2,33E-03 |
| RADIATION.SUM | 11 | 30 | 517,17 | 4,55E-03 |
| RADIATION.SUM | 9 | 26 | 501,65 | 4,43E-03 |
| RADIATION.SUM | 9 | 84 | 496,17 | 5,46E-03 |
| RADIATION.SUM | 9 | 30 | 454,65 | 8,56E-03 |
| RADIATION.SUM | 13 | 84 | 396,78 | 1,24E-03 |
| RADIATION.SUM | 13 | 30 | 396,18 | 3,73E-03 |
| RADIATION.SUM | 13 | 26 | 382,53 | 9,01E-04 |
| RADIATION.SUM | 12 | 30 | 377,77 | 1,98E-03 |
| RADIATION.SUM | 12 | 84 | 373,64 | 8,85E-04 |
| RADIATION.SUM | 12 | 26 | 364,61 | 7,03E-04 |
| RADIATION.SUM | 7 | 84 | 332,96 | 9,24E-03 |
| RADIATION.SUM | 7 | 30 | 322,88 | 7,67E-03 |
| RADIATION.SUM | 7 | 26 | 308,80 | 1,71E-02 |

FIGURE 18 – Liste des indicateurs de somme de rayonnement ayant évolué (p-val < 5%), classés par pente décroissante

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|-------------------|-------|-------------|-------|----------|
| RADIATION.AVERAGE | 12 | 26 | 11,31 | 8,55E-05 |
| RADIATION.AVERAGE | 5 | 26 | 11,04 | 5,16E-05 |
| RADIATION.AVERAGE | 12 | 84 | 10,94 | 3,70E-04 |
| RADIATION.AVERAGE | 11 | 26 | 10,56 | 1,63E-04 |
| RADIATION.AVERAGE | 5 | 84 | 9,42 | 4,92E-04 |
| RADIATION.AVERAGE | 13 | 26 | 8,78 | 1,22E-03 |
| RADIATION.AVERAGE | 12 | 30 | 8,05 | 1,09E-02 |
| RADIATION.AVERAGE | 13 | 84 | 7,99 | 2,17E-03 |
| RADIATION.AVERAGE | 11 | 84 | 7,36 | 9,44E-03 |
| RADIATION.AVERAGE | 2 | 84 | 6,21 | 1,66E-04 |
| RADIATION.AVERAGE | 2 | 26 | 5,93 | 7,76E-04 |
| RADIATION.AVERAGE | 5 | 30 | 5,76 | 1,96E-02 |
| RADIATION.AVERAGE | 10 | 26 | 5,28 | 5,60E-03 |
| RADIATION.AVERAGE | 2 | 30 | 4,93 | 3,09E-02 |
| RADIATION.AVERAGE | 4 | 26 | 4,86 | 3,31E-03 |
| RADIATION.AVERAGE | 4 | 84 | 3,85 | 1,90E-02 |

FIGURE 19 – Liste des indicateurs de rayonnement moyen ayant évolué (p-val < 5%), classés par pente décroissante

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|------------|-------|-------------|-------|----------|
| T.MAX | 12 | 26 | 0,15 | 8,56E-06 |
| T.MAX | 12 | 84 | 0,15 | 1,63E-06 |
| T.MAX | 11 | 26 | 0,15 | 3,71E-06 |
| T.MIN | 11 | 26 | 0,14 | 2,05E-09 |
| T.MAX | 12 | 30 | 0,14 | 8,56E-06 |
| T.MIN | 12 | 26 | 0,14 | 1,06E-08 |
| T.MAX | 5 | 26 | 0,14 | 7,06E-06 |
| T.MIN | 5 | 26 | 0,13 | 1,49E-08 |
| T.MAX | 5 | 84 | 0,13 | 4,02E-06 |
| T.MIN | 12 | 84 | 0,11 | 6,36E-07 |
| T.MIN | 13 | 26 | 0,11 | 5,12E-05 |
| T.MAX | 5 | 30 | 0,11 | 9,73E-06 |
| T.MAX | 11 | 84 | 0,11 | 1,60E-05 |
| T.MIN | 11 | 84 | 0,11 | 2,17E-07 |
| T.MIN | 5 | 84 | 0,11 | 6,73E-07 |
| T.MAX | 13 | 26 | 0,10 | 4,11E-03 |
| T.MIN | 13 | 84 | 0,09 | 2,83E-04 |
| T.MIN | 12 | 30 | 0,08 | 1,71E-05 |
| T.MAX | 13 | 84 | 0,08 | 5,87E-03 |
| T.MAX | 11 | 30 | 0,08 | 7,79E-04 |
| T.MAX | 13 | 30 | 0,08 | 3,92E-03 |
| T.MIN | 5 | 30 | 0,08 | 3,07E-06 |
| T.MIN | 4 | 26 | 0,07 | 1,27E-06 |
| T.MIN | 10 | 26 | 0,07 | 1,56E-05 |
| T.MIN | 11 | 30 | 0,07 | 1,24E-04 |
| T.AMP | 12 | 30 | 0,06 | 6,69E-05 |
| T.MIN | 13 | 30 | 0,06 | 3,12E-03 |
| T.MAX | 9 | 30 | 0,05 | 1,58E-02 |
| T.MAX | 4 | 30 | 0,05 | 2,39E-02 |
| T.MIN | 4 | 84 | 0,05 | 3,74E-04 |
| T.AMP | 9 | 30 | 0,05 | 1,29E-04 |
| T.MAX | 8 | 30 | 0,05 | 7,44E-03 |
| T.MAX | 3 | 30 | 0,05 | 3,13E-03 |
| T.AMP | 5 | 30 | 0,05 | 2,20E-04 |
| T.MAX | 4 | 84 | 0,04 | 3,12E-02 |
| T.MIN | 10 | 84 | 0,04 | 2,51E-03 |
| T.MAX | 4 | 26 | 0,04 | 3,86E-02 |
| T.AMP | 2 | 30 | 0,04 | 2,87E-04 |
| T.AMP | 2 | 84 | 0,04 | 3,72E-04 |
| T.MIN | 1 | 26 | 0,04 | 4,03E-03 |
| T.AMP | 3 | 30 | 0,03 | 8,25E-05 |
| T.AMP | 8 | 30 | 0,03 | 4,26E-03 |
| T.MIN | 4 | 30 | 0,03 | 4,07E-02 |
| T.AMP | 13 | 30 | 0,03 | 2,39E-02 |
| T.AMP | 4 | 30 | 0,03 | 1,05E-02 |
| T.AMP | 2 | 26 | 0,02 | 1,09E-02 |
| T.AMP | 10 | 30 | 0,02 | 3,38E-02 |

FIGURE 20 – Liste des indicateurs de température ayant évolué ($p\text{-val} < 5\%$), classés par pente décroissante

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|------------------------|-------|-------------|-------|----------|
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 1 | 84 | 0,79 | 1,31E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 1 | 30 | 0,77 | 1,95E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 1 | 26 | 0,73 | 1,47E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 2 | 84 | 0,73 | 3,35E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 2 | 26 | 0,72 | 1,12E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 2 | 30 | 0,65 | 5,97E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 26 | 0,61 | 6,81E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 84 | 0,60 | 7,96E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 4 | 30 | 0,60 | 7,89E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 3 | 26 | 0,41 | 1,15E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 10 | 84 | 0,41 | 9,44E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 10 | 30 | 0,40 | 9,74E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 10 | 26 | 0,40 | 1,10E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 3 | 30 | 0,39 | 3,20E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 4 | 30 | 0,38 | 9,96E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 4 | 84 | 0,38 | 5,05E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 3 | 84 | 0,36 | 4,23E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 5 | 26 | 0,35 | 2,84E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 5 | 84 | 0,35 | 4,17E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 5 | 30 | 0,35 | 5,83E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 4 | 26 | 0,32 | 5,90E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 10 | 30 | 0,27 | 1,04E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 8 | 26 | 0,25 | 2,06E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 10 | 84 | 0,25 | 1,67E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 11 | 26 | 0,23 | 2,06E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 5 | 30 | 0,22 | 3,96E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 11 | 30 | 0,22 | 5,03E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 7 | 30 | 0,21 | 6,48E-04 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 9 | 84 | 0,21 | 4,65E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 10 | 26 | 0,21 | 2,18E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 11 | 84 | 0,21 | 5,25E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 5 | 84 | 0,21 | 2,38E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 9 | 26 | 0,21 | 4,62E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 9 | 30 | 0,21 | 6,19E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 13 | 30 | 0,20 | 8,00E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 13 | 26 | 0,18 | 7,20E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 13 | 84 | 0,18 | 1,25E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 11 | 30 | 0,16 | 6,77E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 12 | 30 | 0,16 | 6,30E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 11 | 84 | 0,15 | 3,62E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 12 | 84 | 0,15 | 6,65E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 12 | 26 | 0,14 | 7,78E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 7 | 84 | 0,14 | 1,90E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 11 | 26 | 0,13 | 1,65E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 5 | 26 | 0,12 | 3,22E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil2 | 7 | 26 | 0,12 | 2,44E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 12 | 30 | 0,12 | 4,45E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 9 | 84 | 0,10 | 5,92E-03 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 12 | 84 | 0,10 | 1,13E-02 |
| WATERSTRESS.DAYS.soil1 | 9 | 26 | 0,09 | 2,11E-03 |

FIGURE 21 – Liste des indicateurs de stress hydrique ayant évolué (p-val < 5%), classés par pente décroissante

| Indicateur | Phase | Département | Pente | P-Value |
|---------------|-------|-------------|--------|----------|
| WATER.DEFICIT | 7 | 26 | -3,48 | 2,07E-02 |
| WATER.DEFICIT | 7 | 84 | -3,52 | 1,86E-02 |
| WATER.DEFICIT | 7 | 30 | -3,56 | 9,59E-03 |
| WATER.DEFICIT | 13 | 26 | -5,49 | 9,71E-04 |
| WATER.DEFICIT | 13 | 84 | -5,81 | 1,52E-03 |
| WATER.DEFICIT | 13 | 30 | -6,07 | 4,38E-03 |
| WATER.DEFICIT | 12 | 26 | -6,85 | 5,38E-05 |
| WATER.DEFICIT | 12 | 84 | -6,91 | 1,76E-04 |
| WATER.DEFICIT | 12 | 30 | -7,13 | 4,11E-04 |
| WATER.DEFICIT | 9 | 30 | -7,28 | 4,64E-03 |
| WATER.DEFICIT | 8 | 84 | -8,25 | 3,31E-02 |
| WATER.DEFICIT | 9 | 84 | -8,34 | 2,24E-03 |
| WATER.DEFICIT | 9 | 26 | -8,37 | 1,73E-03 |
| WATER.DEFICIT | 11 | 30 | -9,13 | 3,05E-03 |
| WATER.DEFICIT | 11 | 84 | -9,50 | 9,15E-04 |
| WATER.DEFICIT | 11 | 26 | -9,76 | 1,62E-04 |
| WATER.DEFICIT | 8 | 26 | -10,00 | 6,96E-03 |
| WATER.DEFICIT | 3 | 30 | -11,62 | 3,02E-02 |
| WATER.DEFICIT | 2 | 30 | -13,63 | 8,86E-05 |
| WATER.DEFICIT | 3 | 84 | -13,72 | 1,57E-02 |
| WATER.DEFICIT | 5 | 84 | -14,23 | 4,17E-04 |
| WATER.DEFICIT | 5 | 26 | -14,29 | 1,02E-04 |
| WATER.DEFICIT | 2 | 26 | -14,37 | 6,91E-04 |
| WATER.DEFICIT | 2 | 84 | -14,55 | 8,58E-04 |
| WATER.DEFICIT | 5 | 30 | -14,56 | 1,05E-03 |
| WATER.DEFICIT | 3 | 26 | -15,61 | 4,95E-03 |
| WATER.DEFICIT | 10 | 30 | -17,14 | 5,26E-03 |
| WATER.DEFICIT | 10 | 84 | -18,28 | 3,89E-03 |
| WATER.DEFICIT | 10 | 26 | -18,93 | 1,96E-03 |
| WATER.DEFICIT | 1 | 30 | -23,05 | 3,11E-03 |
| WATER.DEFICIT | 1 | 26 | -24,44 | 6,96E-04 |
| WATER.DEFICIT | 1 | 84 | -25,01 | 1,33E-03 |
| WATER.DEFICIT | 4 | 30 | -25,19 | 4,24E-03 |
| WATER.DEFICIT | 4 | 84 | -27,02 | 2,66E-03 |
| WATER.DEFICIT | 4 | 26 | -27,47 | 1,39E-03 |

FIGURE 22 – Liste des indicateurs de déficit hydrique ayant évolué (p-val < 5%), classés par pente décroissante