

UNIVERSITE
BRETAGNE
LOIRE

THESE / UNIVERSITÉ RENNES 2 HAUTE BRETAGNE
sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE

Mention : Géographie
Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales

présentée par

Etienne Neethling

Préparée à :

Unité Mixte de Recherche 6554 CNRS, LETG Rennes

Unité Expérimentale Vigne et Vin 1117, INRA-SAD Angers-Nantes

Adaptation de la
viticulture au
changement climatique :
vers des stratégies à
haute résolution

Thèse soutenue le 14 décembre 2016

devant le jury composé de :

Hans SCHULTZ

Professeur, Hochschule Geisenheim University / *rapporteur*

Nathalie OLLAT

Ingénieure de recherche, Unité EGFV INRA Bordeaux / *rapporteur*

Cornelis VAN LEEUWEN

Professeur, Bordeaux Sciences Agro / *examineur*

Valérie BONNARDOT

Maître de conférence, Université de Rennes 2 / *examineur*

Cyril TISSOT

Chargé de recherche CNRS, UMR6554 LETG-BREST / *examineur*

Gérard BARBEAU

INRA-SAD UE 1117, Angers-Nantes / Co-directeur de thèse

Hervé QUÉNOL

Directeur de recherche CNRS, UMR6554 LETG-RENNES / Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse, particulièrement mon directeur de thèse Hervé Quénol et mon co-directeur Gérard Barbeau. Merci encore une fois d'avoir cru en moi, de m'avoir soutenu inconditionnellement, malgré que cela n'ait pas toujours été mérité. Vous m'avez appris à être un chercheur, mais aussi un meilleur homme.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de l'Ecole Doctorale SHS de l'Université de Rennes 2, de la région Bretagne et de l'INRA département SAD qui m'ont permis, grâce à une allocation de recherches et diverses aides financières, de me consacrer sereinement à l'élaboration de ma thèse, et cela, malgré mon retard !

Je souhaiterais également remercier tout particulièrement Hans Schultz, Nathalie Ollat, Cornelis Van Leeuwen, Valérie Bonnardot et Cyril Tissot d'avoir accepté d'évaluer mon travail et d'être membre du jury.

Je dois également cette thèse aux viticulteurs de l'AOP Coteaux du Layon et de l'AOP Saumur Champigny. Tout cela n'aurait pu être mené à bien sans leur disponibilité et l'accueil chaleureux qu'ils m'ont témoigné.

Mes remerciements vont aussi à mes anciens collègues de l'unité UVV et du laboratoire COSTEL qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail, particulièrement à Séverine Julien pour sa précieuse aide dans l'installation et l'entretien des capteurs installés, et les observations agronomiques dans les vignes. Malgré vents et tempêtes, tu étais là.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à Jeannine pour ses corrections de français. J'ai apprécié ta grande disponibilité et ton respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je t'ai adressé. Je pense également à Caton, Marcella et Alma qui m'ont aidé à dépasser les barrières de la langue.

Ces remerciements ne peuvent s'achever sans exprimer ma reconnaissance à ceux qui ont plus particulièrement assuré le soutien affectif de ce travail doctoral : ma merveilleuse femme et son amour inconditionnel, mes parents qui n'ont pas hésité à traverser des continents pour être présents quand j'en avais le plus besoin, ma skoonma pour son soutien infailible et mes amis qui, avec cette question récurrente, « quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ? », bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final.

Enfin, je rends gloire à Jésus pour cette thèse durant laquelle Il m'a accompagné du début à la fin. Proverbes 3:19-20 « C'est avec la sagesse que l'Eternel a fondé la terre, et avec l'intelligence qu'Il a disposé le ciel. Par sa science, Il a fait jaillir l'eau des sources et ordonné aux nuages de répandre la rosée ».

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE	
LA VITICULTURE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : CONTEXTE ET ENJEUX	7
CHAPITRE 1	9
CHAPITRE 2	33
CHAPITRE 3	51
DEUXIÈME PARTIE	
LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ANJOU-SAUMUR AU COURS DU 21^e SIÈCLE	63
CHAPITRE 4	69
TROISIÈME PARTIE	
LA DIVERSITÉ ET LA COMPLEXITÉ DE L'ENVIRONNEMENT LOCAL ET DES PRATIQUES DE GESTION	87
CHAPITRE 5	93
CHAPITRE 6	107
CHAPITRE 7	119
CONCLUSION GÉNÉRALE	137
 LISTE DES ABRÉVIATIONS	 143
LISTE DES FIGURES	145
LISTE DES TABLEAUX	151
BIBLIOGRAPHIE	155
ANNEXES.....	177
TABLE DES MATIÈRES	191

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis le premier rapport d'évaluation du GIEC publié en 1990, les connaissances scientifiques concernant le changement climatique ont beaucoup progressé. Dans la majeure partie du monde, les enregistrements climatiques à long terme ont démontré une hausse des températures moyennes de surface¹ dont le réchauffement le plus fort a eu lieu dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord (GIEC 2013). Cette tendance du réchauffement global a été accompagnée par des modifications des régimes de précipitations et de phénomènes climatiques extrêmes. Attribués aux forçages naturels et anthropiques (GIEC 2013), les changements climatiques observés sont projetés de continuer et devenir encore plus apparents et sévères dans le temps (Mora et al. 2013). Dans cette perspective, et en raison des effets du changement climatique déjà en cours et perceptibles sur des systèmes naturels et humains (Hansen et Stone 2016), l'atténuation et l'adaptation sont apparues comme les deux réponses politiques clés pour lutter contre le changement climatique (Smit et al. 1999 ; Klein et al. 2005), agissant à différentes échelles spatiales et temporelles (Tol 2005 ; Fussel et Klein 2006). L'atténuation vise à réduire les sources d'émissions de gaz à effet de serre, ou à développer les puits de carbone. L'atténuation est la réponse la plus avantageuse pour lutter contre le changement climatique car elle permettrait d'en diminuer les causes à l'échelle globale. Or, en raison des longs délais impliqués dans des processus et des rétroactions du système climatique, les effets bénéfiques d'atténuation peuvent prendre de nombreuses décennies à se manifester, quelles que soient leur ampleur et leur intensité (Meehl et al. 2012). L'adaptation au changement climatique est ainsi inévitable, devenant une priorité immédiate dans tous les secteurs sensibles au climat (Fussel 2007 ; Rosenzweig et Tubiello 2007).

La viticulture est l'un de ces secteurs très sensibles aux variations climatiques (Jones et Webb 2010). A long terme, le caractère climatique d'une région viticole détermine en grande partie son potentiel viticole et œnologique (Tonietto et Carbonneau 2004), alors que, à court terme, les variations saisonnières sont des facteurs clés de la production, en quantité et qualité (Jackson et Lombard 1993). Dans de nombreuses régions viticoles, des évolutions significatives des climats régionaux ont déjà été étudiées (Jones et Davis 2000 ; Duchêne et Schneider 2005 ; Jones et al. 2005 ; Ramos et al. 2008 ; Bock et al. 2011 ; Tomasi et al. 2011 ; Webb et al. 2011 ; Neethling et al. 2012 ; Sturman et Quénel 2013 ; Koufos et al. 2014). Ces études ont notamment montré des changements importants au niveau des stades phénologiques de la vigne (i.e. leurs dates et durées) et de la composition des raisins ; cette dernière conduisant à des degrés d'alcool plus élevés et à des profils sensoriels de vins altérés

¹ La température moyenne mondiale (i.e. terres et océans) a augmenté de 0.85°C entre 1880 et 2012 (GIEC 2013).

(Orduna 2010 ; Fraga et al. 2012). Bien que ces modifications dans le comportement de la vigne soient en partie liées à l'évolution des pratiques viticoles, le changement climatique a été le principal facteur mis en évidence (Webb et al. 2012 ; Cook et Wolkovich 2016). De ce fait, l'évolution future du niveau de CO₂, des températures, des précipitations, etc., peut avoir des effets significatifs sur la viticulture, avec des conséquences associées, par exemple, sur les ressources en eau ou sur l'incidence des insectes et des maladies (Rosenzweig et Tubiello 2007 ; Schultz et Stoll 2010). La poursuite du changement climatique pose ainsi de nombreuses questions, allant de la qualité et la typicité des vins dans les prochaines décennies jusqu'à l'aptitude des cépages actuellement cultivés, ou même le maintien d'une activité économique dans certaines régions viticoles à long terme (Schultz et Jones 2010 ; Quénol 2014 ; Barbeau et al. 2015).

Afin de faire face aux effets du changement climatique, à savoir, lutter contre ses impacts environnementaux et socio-économiques, les viticulteurs doivent repenser leurs pratiques et stratégies agronomiques (Battaglini et al. 2009 ; Barbeau et al. 2015 ; Ollat et al. 2016). Bien que l'adaptation ait toujours été un trait caractéristique de la viticulture (Metzger et Rounsevell 2011), l'adaptation au changement climatique reste un concept relativement nouveau et incertain, qui se compose de plusieurs défis temporels et spatiaux. En raison de la pérennité de la vigne, les stratégies et politiques d'adaptation doivent tenir compte des impacts du climat à court et à long terme, et parallèlement entreprendre des mesures adaptées aux caractéristiques spécifiques du contexte local (e.g. milieu naturel, social,...). En considérant ces enjeux multi-échelles, la compréhension de la vulnérabilité d'un système donné au changement climatique, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes, est essentielle pour faciliter et améliorer le processus d'adaptation² (Kelly et Adger 2000 ; Ford et Smit 2004 ; Adger 2006 ; GIEC 2014). Suivant la façon dont la vulnérabilité est interprétée, sa compréhension résultante fournira aux décideurs politiques et aux acteurs impliqués un cadre pour aider à identifier et à prioriser des stratégies d'adaptation (Füssel et Klein 2006 ; O'Brien et al. 2007).

Dans cette perspective, la plupart des études menées dans des régions viticoles visent à évaluer la vulnérabilité de la viticulture aux impacts potentiels du changement climatique (Webb et al. 2007 ; Duchêne et al. 2010 ; Malheiro et al. 2010 ; Hannah et al. 2013 ; Fraga et al. 2015 ; Cabré et al. 2016). Suivant une approche descendante, qui implique toute une série d'étapes successives, ces recherches accordent une grande dépendance à l'égard des projections climatiques régionalisées et des modèles d'impacts biophysiques (Dessai et Hulme 2004 ; O'Brien et al. 2007). Elles montrent que plusieurs stratégies et mesures d'adaptation peuvent être réalisées pour réduire la vulnérabilité future de la viticulture. Par exemple, des changements dans les pratiques culturelles liées à la gestion de la vigueur et à l'entretien du sol, l'utilisation des matériels végétaux plus tolérants à la sécheresse et à la chaleur (Quénol 2014 ; Mozell et Thach 2014 ; Van Leeuwen et Darriet 2016), ou plus drastiques, le déplacement géographique de la viticulture aux régions non traditionnellement

² L'adaptation concerne l'ensemble des mesures réalisées (i.e. réactives/anticipées ou individuelles/collectives) dont le but est de réduire la vulnérabilité d'un système au changement climatique, ou d'exploiter des opportunités bénéfiques, à différentes échelles temporelles et spatiales (GIEC 2014).

viticoles (Hannah et al. 2013). Cependant, elles indiquent un large éventail de mesures d'adaptation possibles, plutôt que celles réelles (Smit et Wandel 2006; Crane et al. 2011). En effet, malgré la compréhension accrue apportée sur le changement climatique et ses impacts, en particulier à long terme, ces études comportent plusieurs lacunes :

- i. Les modèles climatiques présentent une grande incertitude sur l'expression locale du changement climatique, liée d'une part au modèle climatique utilisé et à la méthode de désagrégation et d'autre part, à l'imprévisibilité du futur.
- ii. Les incertitudes résultent également de l'incapacité structurelle des modèles d'impacts à capturer tous les facteurs abiotiques influents, et vu qu'ils se concentrent principalement sur les aspects naturels d'un système, les dimensions humaines d'adaptation sont limitées.
- iii. La nature contextuelle de l'adaptation peut amener les acteurs locaux à avoir des difficultés à identifier les stratégies d'adaptation les plus appropriées, en raison de la grande diversité de mesures possibles.

Pour construire des politiques et des stratégies d'adaptation plus efficaces, il devient nécessaire d'élaborer un cadre méthodologique permettant de mieux définir et comprendre la diversité et la complexité de l'environnement local et des pratiques de gestion. Ceci est particulièrement approprié dans le secteur viticole puisque la qualité des raisins et des vins produits est fortement liée aux caractéristiques uniques de leur situation géographique (White et al. 2009 ; Metzger et Rounsevell 2011), où les prises de décision des viticulteurs sont importantes (Van Leeuwen et Seguin 2006). En effet, le manque de compréhension de ces processus et facteurs locaux qui définissent la vulnérabilité contextuelle (Ford et Smit 2004 ; Crane et al. 2011), conduira à une évaluation erronée de l'impact potentiel du changement climatique et notamment, des stratégies d'adaptation nécessaires à différentes échelles temporelles et spatiales (Holland et Smit 2010 ; Quénol 2014).

Présentation de l'étude

Dès 2008, dans le cadre du projet ANR-TERVICLIM³, un programme de recherche a été mis en place afin de commencer à étudier la diversité et la complexité climatique et agronomique à échelle fine des terroirs viticoles. Ces travaux ont été menés dans de nombreuses régions viticoles du monde, dont l'un des sites pilotes a été situé en Val de Loire, à savoir l'AOP Coteaux du Layon (Coulon et al. 2009 ; Bonnefoy et al. 2010). Depuis, ces travaux de recherches ont été poursuivis dans le projet international GICC-TERADCLIM⁴ (Quénol et Bonnardot 2014), le projet national INRA-LACCAGE⁵ (Ollat et Touzard 2014), et se poursuivent actuellement, dans le projet européen LIFE-ADVCLIM⁶ (Quénol et al. 2014) ; ce dernier abordant en particulier des enjeux liés à l'atténuation et l'adaptation au

3 TERVICLIM (2008-2012) : Observation et modélisation spatiale du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique.

4 TERADCLIM (2011-2013) : Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles

5 LACCAGE (2012-2015) : Long-term adaptation to climate change in viticulture and enology

6 ADVCLIM (2014-2019) : Adaptation of viticulture to climate change: High resolution observations of adaptation scenarios for viticulture

changement climatique. Cette étude s'inscrit dans la problématique générale de ces différents projets, et pour y répondre, elle se construit autour de quatre objectifs (Figure 1) :

- Le premier objectif, traité dans le chapitre 4, est d'analyser les projections du changement climatique pour la sous-région viticole d'Anjou-Saumur, située en Val de Loire. Suivant une approche descendante, les données climatiques issues d'un modèle régional sont étudiées selon trois scénarios de GIEC (2013). Cet objectif est divisé en trois sous-buts : analyser la variabilité spatio-temporelle de la tendance future des données de température et de précipitation, appliquer divers indices agroclimatiques permettant d'évaluer les impacts potentiels sur la viticulture, discuter de ces impacts et des incertitudes associées avant de conclure sur la question d'adaptation.

Afin de répondre aux lacunes précédemment présentées,

- Les deuxième et troisième objectifs sont d'étudier la variabilité spatiale du climat et du comportement de la vigne à échelle fine dans les vignobles. Pour cela, un dispositif de mesures climatiques et agronomiques a été mis en place dans l'AOP Coteaux du Layon et l'AOP Saumur Champigny, situés en Anjou-Saumur. Ces deux sites sont très contrastés du point de vue géo-pédologique, mésoclimatique et de production de vin. Les résultats de ces deux objectifs sont exposés dans les chapitres 5 et 6, dont les sous-buts sont : présenter la variabilité spatiale des conditions agroclimatiques sur trois années et analyser l'influence de l'environnement naturel et des pratiques de gestion. Dans le contexte de l'adaptation de la viticulture au changement climatique, la compréhension locale des caractéristiques et potentialités agroclimatiques doit permettre de mieux évaluer les conséquences futures du changement climatique, ainsi que d'identifier les leviers d'adaptation qui existent aux échelles locales. Cette dernière contribuant au raisonnement des stratégies d'adaptation à mettre en œuvre.
- Le quatrième objectif, abordé dans le chapitre 7, est d'évaluer la vulnérabilité locale et la capacité d'adaptation des viticulteurs en se basant sur le vécu récent et leur vision du futur. Basés sur une approche ascendante, des entretiens semi-directifs ont été réalisés auprès des viticulteurs, en essayant de déterminer les conditions contextuelles (i.e. climatiques et non-climatiques) qui conditionnent la vulnérabilité locale, aussi bien que les stratégies d'adaptation mises en œuvre ou à mettre en œuvre dans un contexte de changement climatique (i.e. autonomes, planifiées). Ce dernier objectif doit permettre d'intégrer les dimensions humaines dans la construction des scénarios d'adaptation et en particulier, de mieux comprendre la nature dynamique des prises de décision des viticulteurs.

Compte tenu de ces objectifs, cette étude s'articule en trois parties :

La **première partie** présente le cadre scientifique de l'étude. Elle concerne la complexité spatiale et la dynamique temporelle de la viticulture ; l'état des connaissances concernant le changement climatique et ses impacts actuels sur la viticulture ; les méthodes d'évaluation de l'adaptation au changement climatique.

La **deuxième partie** analyse le changement climatique en Anjou-Saumur au cours du 21^e siècle, et la **troisième partie** discute de la diversité et de la complexité de l'environnement local et des pratiques de gestion des viticulteurs. Pour cette dernière partie, les résultats sont présentés en trois chapitres.

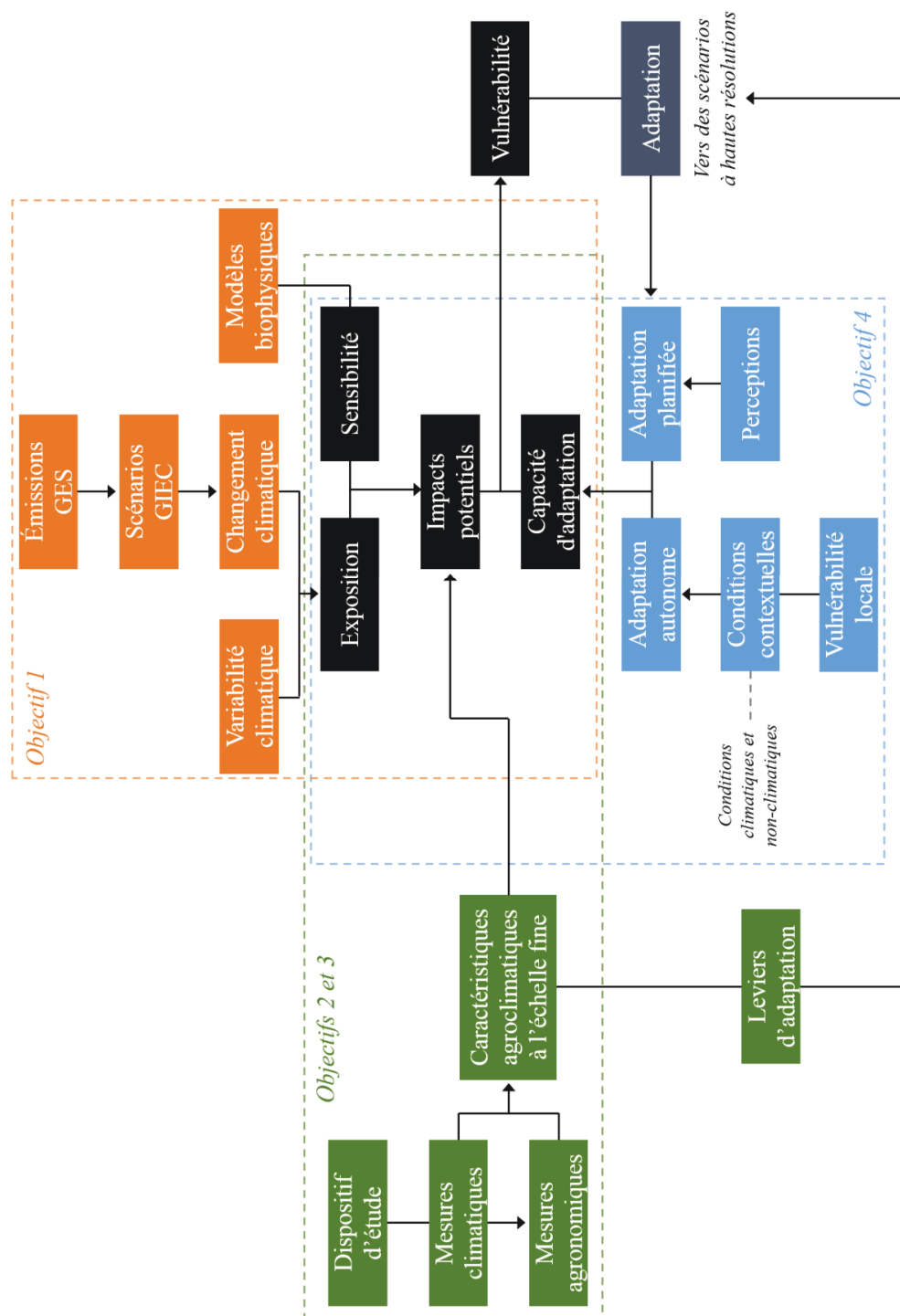


Figure 1 : Cadre conceptuel de l'étude

PREMIÈRE PARTIE

LA VITICULTURE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : CONTEXTE ET ENJEUX

La première partie a pour objectif de présenter la viticulture dans le contexte du changement climatique, afin de comprendre les enjeux complexes qui y sont liés, en particulier celui de l'adaptation. Dans le premier chapitre, le rôle du climat et des dimensions humaines sur la vigne et le vin seront abordés afin d'illustrer la complexité spatiale et la dynamique temporelle de la viticulture. Le deuxième chapitre se focalisera sur le changement climatique dans différentes régions viticoles du monde, en montrant l'évolution récente du climat et ses impacts associés. Selon des tendances futures du climat, les impacts attendus sur la viticulture seront également discutés. Le troisième, et dernier chapitre de cette première partie, présentera le concept de l'adaptation au changement climatique, ainsi que des différentes approches méthodologiques pour l'évaluer.

SOMMAIRE

		<i>Page</i>
Chapitre 1	De la vigne au vin : Rôle du climat et des dimensions humaines	9
Chapitre 2	Le changement climatique et la viticulture	33
Chapitre 3	Vers une adaptation raisonnée au changement climatique	51

CHAPITRE 1

De la vigne au vin : Le rôle du climat et des dimensions humaines

INTRODUCTION

Cultivée et façonnée par l'homme depuis l'antiquité et répandue à travers le monde, la vigne possède une riche histoire géographique et culturelle (Dougherty 2012). À présent, elle est cultivée dans plus de soixante-dix pays, couvrant une superficie totale de 7 573 Mha (OIV 2015). Malgré leurs surfaces viticoles en baisse, l'Espagne, la France et l'Italie représentent à elles seules, 33% de la superficie mondiale. Dans des pays non européens, les surfaces ne cessent d'augmenter, particulièrement en Chine. Bien qu'il existe des différences d'un pays à l'autre, les raisins produits sont principalement utilisés pour l'élaboration du vin, et dans une moindre mesure, pour la production de fruits frais, de fruits secs et de jus de fruit. Cette aptitude de la vigne à produire une large gamme de types de vins et de types de produits est attribuée à sa grande diversité génétique (Encadré 1.1). Chaque cépage est unique et se distingue par ses caractéristiques morphologiques, sa sensibilité aux maladies et ses qualités productives. En interaction avec l'environnement abiotique, il se différencie aussi par ses exigences climatiques (Huglin et Schneider 1998), conduisant à des « niches climatiques » dans lesquelles il prospère (Jones et al. 2005). La vigne est ainsi très sensible aux variations climatiques, à savoir, dans le temps à court et à long terme, mais aussi à travers l'espace, en raison des conditions climatiques qui sont tributaires des propriétés de surface (Quénol 2014).

Le climat exerçant un rôle déterminant sur la vigne, et sa production associée, le changement climatique soulève de nombreuses questions, liées en particulier aux impacts futurs et aux mesures d'adaptation nécessaires (Schultz et Jones 2010 ; Ollat et al. 2016). Pour y répondre, l'enjeu d'échelle est devenu central pour comprendre des défis, ou des opportunités, temporels et spatiaux apportés par un climat changeant (O'Brien et al. 2004). Toutefois, afin de répondre à ces questions clés qui entourent le changement climatique et la viticulture, il est essentiel de tenir compte du rôle des dimensions humaines (Holland et Smit 2010). La vigne reste une culture maîtrisée par le viticulteur (Van Leeuwen et Seguin 2006), qui agit sur son environnement dans un contexte de conditions socio-économiques et réglementaires, en constante évolution. La viticulture est de ce fait un système complexe et dynamique, caractérisé par des interactions entre des facteurs abiotiques (température,...), biotiques (vigne,...) et anthropiques (pratiques viticoles,...). Dans cette perspective, ce chapitre vise à illustrer la complexité spatiale et la dynamique temporelle de la viticulture, car la compréhension de celles-ci permettra de mieux évaluer l'impact du changement climatique,

aussi bien que la façon dont les stratégies d'adaptation doivent être raisonnées. A cet effet, le chapitre commence par présenter les principaux facteurs climatiques qui agissent sur le fonctionnement de la vigne. Dans un deuxième temps, les échelles spatio-temporelles de la viticulture seront développées afin d'illustrer le rôle du climat et des dimensions humaines. Le chapitre conclura sur la notion de terroir et son usage dans la viticulture.

Encadré 1.1 Espèces et variétés de vigne

De la famille des *Vitaceae*, la vigne appartient au genre *Vitis* (Vivier et Pretorius 2000 ; Jackson 2008). Localisé essentiellement dans des climats tempérés, toutes les espèces de ce genre sont des plantes à tiges sarmenteuses, munies de vrilles ou d'inflorescences opposées aux feuilles (Reynier 2007). Ce genre est constitué en deux sous-genres, *Eu vitis* et *Muscadinia*, et parmi les espèces d'*Eu vitis*, l'espèce *vinifera* est celle largement utilisée dans le secteur viticole (Figure 2). Originnaire d'Europe et d'Asie occidentale, elle présente de grandes qualités pour la production de raisins de cuve, de raisins de table et de raisins secs (Reynier 2007). Au cours de sa domestication, elle a subi plusieurs changements (e.g. de fleurs dioïques vers celles hermaphrodites) qui ont assuré un taux de sucre plus élevé, une production plus régulière, etc. (This et al. 2006). Aujourd'hui, il existe de nombreuses variétés domestiquées, appelées cépages (e.g. Pinot, Cabernet,...), ce qui est démontré en partie par la collection variétale au domaine de Vassal (France), comptant 2 344 cépages (Boursiquot et al. 1999 ; Lacombe 2015).

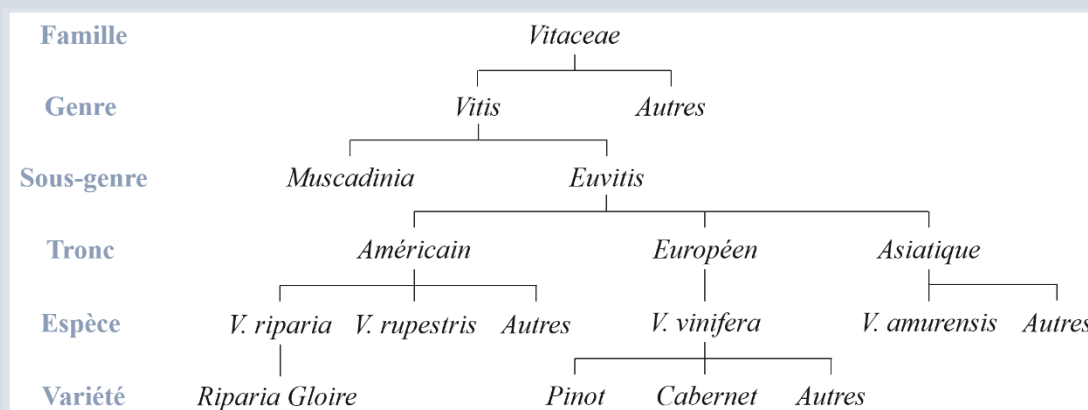


Figure 2 : La phylogénie simplifiée du genre *Vitis* (Reynier 2007)

Depuis sa domestication il y a 6 000 à 8 000 ans (Myles et al. 2011), l'espèce *vinifera* a été propagée et cultivée sur ses propres racines, jusqu'à l'arrivée du phylloxera vers la fin du 19^e siècle. Originnaire d'Etats-Unis, le Phylloxera est un puceron ravageur, qui attaque les racines de la vigne. En Europe, il a entraîné des pertes dévastatrices des surfaces viticoles et de la diversité variétale, ce qui a eu des impacts économiques considérables (This et al. 2006). Pour y lutter, la seule stratégie efficace était de greffer les variétés européennes (i.e. non-résistantes) sur des variétés de porte-greffes, issues d'espèces américaines résistantes au Phylloxera. Ces variétés de porte-greffes sont soit issues d'espèces individuelles (e.g. Riparia Gloire de *V. riparia*) ou des croisements de plusieurs espèces (e.g. 3309 Couderc de *V. riparia* et *V. rupestris*). Mis à part cette résistance, elles sont aussi utilisées pour lutter contre d'autres ravageurs transmis par le sol (e.g. nématodes), ou pour améliorer la

performance de la vigne, ce qui fait que la pratique courante aujourd'hui consiste à greffer un cépage sur une variété de porte-greffe.

1.1. Facteurs climatiques

L'agriculture est l'un des secteurs les plus sensibles au climat (Adams et al. 1998 ; Howden et al. 2007). Dans l'espace, le climat influence le type d'activité agricole mené, alors que dans le temps, il régule la productivité agricole. En conséquence, il a une incidence majeure sur la viabilité économique de l'agriculture, et cela se manifeste davantage en viticulture. De nombreuses études ont démontré son rôle central sur des aspects quantitatifs (e.g. la biomasse pérenne, le rendement,...) et qualitatifs (e.g. la composition des raisins,...) de la vigne (Buttrose et al. 1971 ; Winkler et al. 1974 ; Coombe 1987 ; Jackson et Lombard 1993 ; Jones et Davis 2000 ; Van Leeuwen et al. 2004 ; Carey et al. 2008). Fortement liés aux caractéristiques biochimiques des raisins (Cadot et al. 2012 ; Bindon et al. 2013), les attributs qualitatifs des vins (e.g. profil sensoriel, potentiel de vieillissement...) sont de même très dépendants du climat (Soar et al. 2008 ; Makra et al. 2009 ; Baciocco et al. 2014 ; Fraga et al. 2014). Dans cette perspective, et en lien avec son impact sur le volume des vins produits, le climat a des impacts économiques considérables (Haeger et Storchmann 2006 ; Ashenfelter et Storchmann 2016). Afin de comprendre l'influence du climat sur la viticulture, à savoir, à travers l'espace et dans le temps, il est premièrement nécessaire d'identifier quels sont les principaux facteurs climatiques. Or, les fonctions spécifiques de chacun de ces facteurs sont au-delà des objectifs de cette partie, ayant déjà été largement décrites par Carbonneau et al. (1992), Mullins et al. (1992), Huglin et Schneider (1998), Jackson (2008) et Keller (2015). L'objectif est, ici, de souligner quels sont les principaux facteurs qui agissent directement ou indirectement sur le fonctionnement de la vigne, sachant que la mesure dans laquelle un facteur climatique affecte la vigne est déterminée par la nature des autres facteurs.

1.1.1. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire étant la principale source d'énergie lumineuse et thermique (Keller 2015), la vigne est très sensible à ses fluctuations en termes de durée (i.e. la photopériode), de quantité (i.e. l'intensité) et de qualité (i.e. la composition spectrale). Au cours de la saison de croissance de la vigne, il a pour rôle principal d'activer et de maintenir à un niveau optimal le processus de photosynthèse (Smart et al. 1988 ; Huglin et Schneider 1998), qui consiste à transformer l'énergie lumineuse⁷ en énergie chimique, permettant de synthétiser des glucides et d'autres composés organiques. A ce titre, il est également un élément central dans des processus activés par la lumière, tels que l'initiation des inflorescences, l'aoûtement des sarments et la synthèse de composés phénoliques (Jackson 2008). A part ses effets lumineux, il intervient également sur la croissance de la vigne et la maturation des raisins par ses effets

⁷ L'énergie lumineuse est apportée par les rayons visibles dont les longueurs d'onde vont de 400 à 700 nm. Absorbée par les pigments photosynthétiques, cette partie du spectre électromagnétique est appelée le rayonnement photosynthétiquement actif (RPA, ou PAR en anglais)

thermiques⁸, qui affectent le taux des processus biochimiques (Keller 2010). Cela peut se faire soit indirectement par le fait que le rayonnement incident réchauffe la température environnante, soit directement où l'énergie absorbée par la vigne augmente l'état thermique des organes végétatifs (e.g. les feuilles,...) et reproductifs (e.g. les baies,...). De ce fait, même si certaines études ont tenté d'évaluer leurs actions individuellement (Spayd et al. 2002 ; Tarara et al. 2008), il reste difficile de séparer le rôle du rayonnement solaire de celui de la température de l'air (Downey et al. 2006). En effet, des processus biochimiques, tels que la photosynthèse, sont très sensibles à la lumière et à la température. Enfin, le rayonnement solaire exerce également un effet inhibiteur sur le développement des maladies (Williams et al. 2007).

1.1.2. La température de l'air

De la levée de la dormance en hiver à la chute des feuilles en automne, la vigne répond de façon globale et coordonnée à la température de l'air (Carbonneau et al. 2007). Dans un premier temps, la vigne est soumise à de nombreuses perturbations physiologiques, lorsque la température de l'air dépasse certains seuils critiques. En hiver, des températures inférieures de -15°C à -20°C provoquent de graves blessures, qui varient des bourgeons d'hiver endommagés à la mortalité des souches de vigne (Dami et al. 2012). Au printemps, au moment de la reprise de croissance, la vigne est très sensible aux températures inférieures à 0°C, en particulier celles de -2,5°C (Reynier 2007 ; Poling 2008). Alors que moins graves pour la pérennité des souches, elles peuvent causer la mortalité des bourgeons primaires ou des jeunes pousses, ce qui retarde le développement végétatif, réduit le rendement, dont les conséquences ne sont pas seulement pour l'année en cours, mais même pour la suivante (Jackson 2008). En automne, des gelées entraînent la chute des feuilles et perturbent la physiologie de la vigne. Cette dernière signifie une inhibition des processus tels que la photosynthèse, qui en période de maturité, limite l'accumulation des sucres dans les raisins, ou en période post-vendange, la mise en réserve des glucides dans les organes pérennes (e.g. tronc, racines,...). A l'inverse, des températures caniculaires (e.g. >35°) ont des conséquences à la fois physiologiques et physiques (Greer et Weston 2010 ; Webb et al. 2010). Elles provoquent l'échaudage, qui inhibe la croissance des raisins, retarde l'accumulation de sucre, empêche la coloration et dessèche partiellement ou complètement des grappes.

Au cours de la saison de croissance, le fonctionnement de la vigne commence généralement à partir d'une température limite de 10°C, ce qui est considéré comme le zéro de végétation (Huglin et Schneider 1998). En effet, le développement et la croissance de la vigne dépendent fortement de la manière dont des processus biochimiques réagissent à la température de l'air. Bien que la réponse de ces processus augmente en parallèle avec la température, ils présentent un optimum thermique. A ce titre, deux processus complexes et indépendants sont fondamentaux, la photosynthèse et la respiration. Dans un environnement de lumière et d'alimentation hydrique favorable, l'activité de la photosynthèse augmente à

8 L'activité photosynthétique de la vigne augmente avec l'intensité du rayonnement, atteignant un plateau (i.e. saturation) lorsque le rayonnement est à un tiers de son intensité maximale. De ce fait, en particulier lors des journées ensoleillées, la majeure partie de l'énergie interceptée par la vigne est libérée sous forme de chaleur.

partir de 10°C, se stabilise entre 25°C et 30°C, et s'annule vers 40°C (Figure 3a). Contrairement à la photosynthèse, le taux de la respiration augmente rapidement avec la température, de jour comme de nuit. Cet effet de la température est très important, car la croissance se produit lorsque l'activité de la photosynthèse est supérieure à celle de la respiration. Ainsi, la croissance s'accélère en parallèle avec la température jusqu'à l'optimum thermique de 25°C à 30°C, et puis se ralentit lorsque la température augmente encore (Downey et al. 2006 ; Keller 2010). Ce rôle déterminant de la température sur des réactions biochimiques signifie qu'elle est également un facteur décisif de la composition des raisins (Figure 3b). En période de maturation, l'augmentation de la température favorise l'accumulation des sucres et la durée de maturation, mais seulement jusqu'au seuil où la photosynthèse est inhibée (Coombe 1987 ; Ribéreau-Gayon et al. 2006 ; Jackson 2008). Lorsque la température de l'air augmente, l'acide tartrique a tendance à rester stable alors que l'acide malique diminue rapidement. Ce dernier est le substrat principalement respiré pendant la maturation, où la vitesse de sa respiration est étroitement liée à la température (Keller 2010). Sous des températures diurnes élevées, des températures nocturnes fraîches sont essentielles pour préserver l'équilibre entre le sucre et l'acidité (Carey et al. 2008). Concernant des métabolites secondaires, la synthèse des anthocyanes est favorisée par une température diurne chaude (20°C à 25°C) et une température nocturne fraîche (10°C à 15°C). L'accumulation des anthocyanes est limitée par des températures de l'air dépassant 35°C (Mori et al. 2007). Des températures fraîches, en particulier celles nocturnes, sont aussi propices à l'expression des arômes. Cela dépend néanmoins du type d'arôme recherché. Par exemple, les méthoxypyrazines sont responsables des arômes herbacés et souvent recherchés pour des cépages blancs, tels que le Sauvignon blanc. Or, pour d'autres cépages riches en méthoxypyrazines (e.g. Cabernet franc,..), des températures plus élevées sont plus désirées pour réduire la concentration de ces arômes.

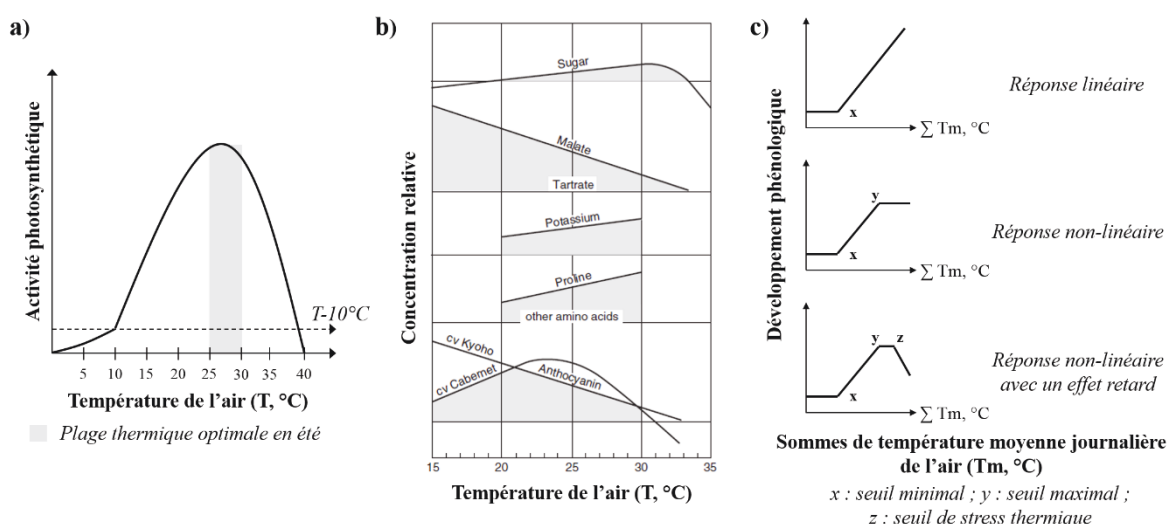


Figure 3 : a) La réponse de l'activité photosynthétique de la vigne à la température de l'air (T, °C) (Carbonneau et al. 2007) ; b) l'effet de la température de l'air sur la concentration des composés de raisins (Coombe 1987) ; et c) les réponses du développement phénologique de la vigne à l'accumulation des températures moyennes journalières de l'air (Tm, °C) (Molitor et al. 2014).

Enfin, le développement phénologique de la vigne dépend de l'effet cumulatif de la température de l'air, ce qui correspond au principe des degrés-jours de croissance (Winkler et al. 1974 ; Huglin et Schneider 1998). Ce principe considère que l'apparition des différents stades phénologiques (e.g. floraison, véraison,...), et leurs durées associées (i.e. phénophase), sont conduites par des sommes de températures journalières moyennes de l'air au-dessus d'un seuil minimal. Dans ce contexte, trois aspects sont importants. Premièrement, bien que le seuil limite à partir duquel la vigne se développe est généralement de 10°C, dans la réalité, il peut être plus variable, comme démontré pour le stade de débourrement (Moncur et al. 1989, Nendel 2010). Deuxièmement, à chaque cépage est associée une quantité de chaleur nécessaire pour qu'il puisse passer d'un stade à un autre (Figure 4). Ainsi, les cépages précoces (e.g. Pinot, Gewürztraminer,...) requièrent moins de chaleur pour atteindre la maturation que ceux tardifs (e.g. Carignan, Ugni blanc,...). Et troisièmement, en tenant compte seulement d'un seuil minimal (indiqué en x, Figure 3c), il existe une relation linéaire entre le développement phénologique et l'accumulation quotidienne de chaleur. Or, cette représentation linéaire est inexacte, en particulier dans des régions à climat chaud (Cuccia et al. 2014) où les températures diurnes élevées perturbent la physiologie de la vigne. Par conséquent, au-dessus de certains seuils critiques (indiqué en y et z, Figure 3c), l'effet de forçage de la température de l'air ne conduira pas à une avancée des stades phénologiques (Gladstones 1992 ; Wang et Engel 1998) et peut même conduire à une tendance de retard du développement phénologique (Molitor et al. 2014).

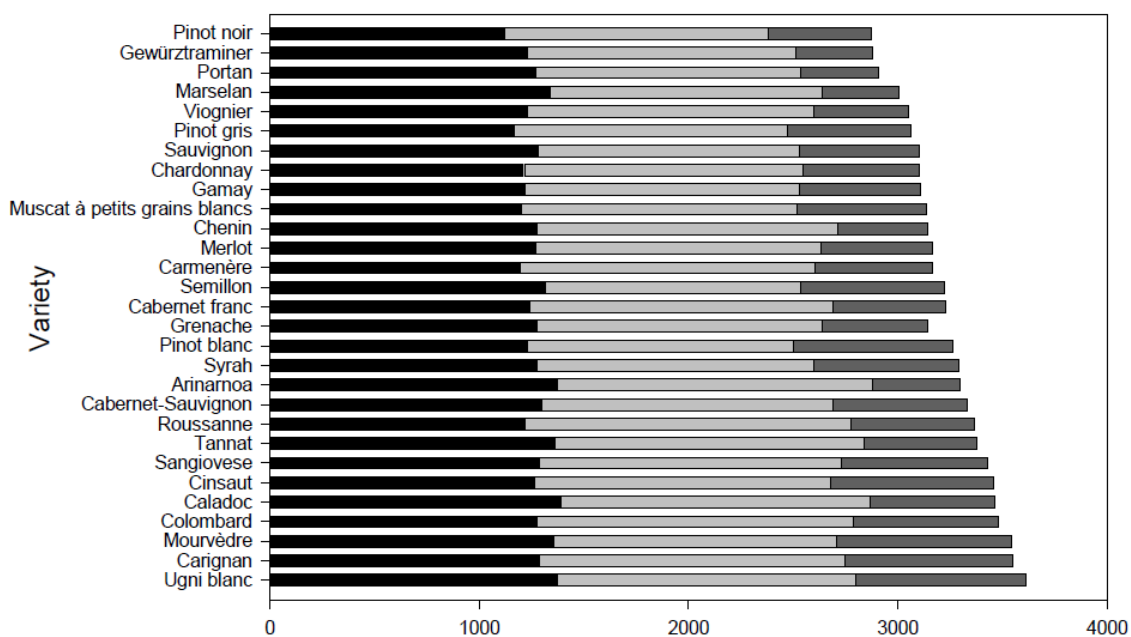


Figure 4 : Classification d'une large gamme de cépages (i.e. du plus précoce au plus tardif) selon leurs exigences thermiques pour atteindre la mi-floraison (la durée jusqu'à la mi-floraison est indiquée en noir), la mi-véraison (la durée floraison-véraison est indiquée en gris clair) et la concentration en sucre de 200 g/L (la durée véraison-sucre de 200g/L est indiquée gris foncé). Ces exigences correspondent aux sommes de températures moyennes journalières calculées à partir du 1 mars dans l'hémisphère nord (i.e. jour 60), avec une température de base est de 0°C (Parker 2012).

1.1.3. Les précipitations

Dans la majorité des régions viticoles françaises, les vignes ne sont pas irriguées. De ce fait, les précipitations ont un rôle déterminant sur le niveau d'alimentation hydrique de la vigne, un facteur clé du comportement de la vigne et de la qualité de la vendange (Encadré 1.2). Non seulement la pluviométrie totale est critique dans cette perspective, mais aussi sa périodicité en relation avec les cycles de croissance de la vigne. En période hivernale, les sommes de précipitations doivent assurer la recharge hydrique des sols, ou dans le cas où l'irrigation est autorisée et utilisée, la recharge des réserves en eau (e.g. nappe souterraine, barrages,...). En période estivale, le comportement de la vigne est favorisé par une faible pluviométrie totale, sauf en cas de forte sécheresse estivale. D'autres effets indirects des précipitations se manifestent à travers l'incidence des maladies cryptogamiques (e.g. le mildiou, l'oïdium,...). Favorisées par la hauteur et la régularité des précipitations, elles entraînent d'importantes pertes quantitatives et qualitatives de la récolte (Jermini et al. 2010). Les précipitations ont également des effets directs sur le comportement de la vigne, qui sont particulièrement révélés lors de la floraison et de la maturation, deux périodes clés qui nécessitent des conditions sèches. Par exemple, les précipitations pendant la maturation conduisent à augmenter la taille et ainsi le volume des baies, ce qui dilue leur composition (Coombe et McCarthy 2000 ; Van Leeuwen et al. 2009). Enfin, de fortes précipitations orageuses peuvent provoquer de la grêle, ce qui cause des blessures considérables, voire néfastes, sur les grappes et la végétation de la vigne.

Encadré 1.2 Alimentation hydrique⁹

L'alimentation hydrique dépend du climat (e.g. la température, la pluviométrie,...) et des propriétés physiques du sol (e.g. la texture, la profondeur,...). Au cours de la saison de croissance, les apports d'eau à la vigne sont ainsi liés à la réserve en eau du sol au début de la saison, la pluviométrie et/ou l'irrigation, tandis que les pertes concernent l'évaporation directe du sol, la transpiration de la végétation et le taux de ruissellement (Coulon-Leroy et al. 2014). Quant à son rôle sur le fonctionnement de la vigne, de nombreuses études ont conclu que l'alimentation hydrique est un facteur clé de qualité de la vendange (Matthews et Anderson 1988 ; Matthews et al. 1990 ; Morlat et al. 1992 ; Koundouras et al. 1999 ; Kennedy et al. 2002 ; Ojeda et al. 2002 ; Koundouras et al. 2006 ; Van Leeuwen et al. 2009). En effet, le rôle de l'eau dans le métabolisme cellulaire est reconnu de première importance. L'eau, indispensable à l'activité photosynthétique de la vigne, intervient entre autres dans le transport des éléments minéraux, à travers les vaisseaux du xylème et du phloème. Au niveau du sol, l'eau est une des conditions de réalisation des processus de minéralisation de l'azote et de l'assimilation des nutriments par la vigne. L'eau, par ses fonctions intra et extra cellulaires, permet d'assurer à la vigne non seulement un fonctionnement correct, mais garantit également sa pérennité.

Le développement des raisins peut être divisé en deux grandes étapes de croissance, séparées par une phase de ralentissement. Au cours de l'étape I, l'accroissement des baies

⁹ Cette partie a été adaptée de Quénol (2014).

dépend en grande partie de l'alimentation hydrique. Au cours de l'étape III, les besoins en eau s'avèrent moindres puisqu'une contrainte hydrique modérée est bénéfique à la qualité de la vendange (Van Leeuwen et al. 2009). Celle-ci contribue à réduire la concurrence pour les métabolites issus de la photosynthèse, permettant à ceux-ci d'être transportés vers les raisins, sans limiter la photosynthèse. Les raisins issus de ce type de fonctionnement ont une teneur correcte en sucre, en acidité, en composés phénoliques et une bonne expression d'arôme. Inversement, une alimentation hydrique excessive incite la croissance végétative (e.g. rameaux, feuilles) et reproductive (i.e. poids des grappes) au détriment de la précocité et de la maturation des raisins. Bien que les rendements soient plus élevés, les concentrations en sucres, acides organiques et composés phénoliques sont plus faibles, celles-ci ayant une répercussion négative sur la qualité des vins. Dans le cas d'une contrainte hydrique sévère, le manque excessif d'eau induit une fermeture des stomates, ce qui limite la photosynthèse et en conséquence diminue la cinétique d'accumulation des sucres, alors que, parallèlement, la combustion d'acide malique se poursuit (Morlat et al. 1992 ; Ojeda et al. 2002).

1.1.4. Le vent

En fonction de la vitesse du vent, il peut y avoir des effets positifs ou négatifs sur la vigne (Jones et al. 2012). De manière négative, les vents forts ont des conséquences physiques (e.g. casser des rameaux) et physiologiques (Freeman et al. 1982 ; Dry et al. 1988 ; Campbell-Clouse 1998 ; Carey et al. 2008). Cette dernière se réfère à la fermeture des stomates lorsque le vent est supérieur à 4 m/s, ce qui inhibe l'activité de la photosynthèse et de la transpiration. En raison de ces perturbations physiologiques, des vignes exposées à des vents forts sur une longue période de temps ont des rameaux réduits, des feuilles plus petites, un nombre de grappes plus faible et des périodes de maturité retardées. Le vent a également plusieurs effets bénéfiques. Une bonne circulation de l'air maintien des flux optimaux d'échanges gazeux entre la vigne et son environnement et, surtout, elle disperse l'excès d'humidité qui peut exister suite à des périodes humides ou des brouillards matinaux, réduisant ainsi le risque de nombreuses maladies (Jackson 2008 ; Jones et al. 2012). Dans des régions à climat chaud (e.g. la région du Cap, Afrique du Sud), les vignobles peuvent également bénéficier de l'effet de refroidissement (i.e. diminution de la durée et de l'intensité du stress thermique), apporté par des brises de mer (Bonnardot et al. 2005).

1.2. La complexité spatiale de la viticulture

La notion d'échelle spatiale est fondamentale en viticulture (Vaudour 2002). A grande échelle, elle explique la géographie viticole et la distribution des cépages, alors qu'à petite échelle, elle accentue la variabilité et la diversité qui existent d'un lieu à un autre, valorisant de ce fait la qualité et la typicité¹⁰ des vins obtenus. Le fonctionnement de la vigne étant tributaire des conditions climatiques, la description spatiale de la viticulture suit ainsi de près

¹⁰ La typicité se réfère à la notion de « air de famille », où le vin produit devrait avoir un ensemble d'attributs biochimiques et sensoriels qui sont fortement liés à, ou partagés avec, son origine géographique (Salette 2006 ; Cadot et al. 2012).

la structure et l'organisation du climat (Asselin et al. 2001 ; Vaudour 2002 ; Vaudour et Shaw 2005), dont deux aspects sont importants :

- Premièrement, il faut tenir compte de la structure multi-niveau du climat. Bien que les limites entre les différents niveaux ne soient pas toujours évidentes, on peut distinguer quatre ordres de grandeur spatiale avec des caractéristiques climatiques distinctes (Oke 1987 ; De Parcevaux et Hubert 2007) :
 - i. Le macroclimat s'applique à une vaste zone géographique (e.g. région viticole, pays,...), avec une superficie supérieure de 100 km (Figure 5).
 - ii. Le mésoclimat correspond aux caractéristiques climatiques d'une région de taille très variable, allant de 10 km à 200 km.
 - iii. Le climat local est le climat d'une zone plus réduite, généralement de l'ordre de 100 m à 50 km.
 - iv. Le microclimat représente le niveau de variation climatique la plus fine, ce qui correspond à une entité géographique très réduite (< 1 km).

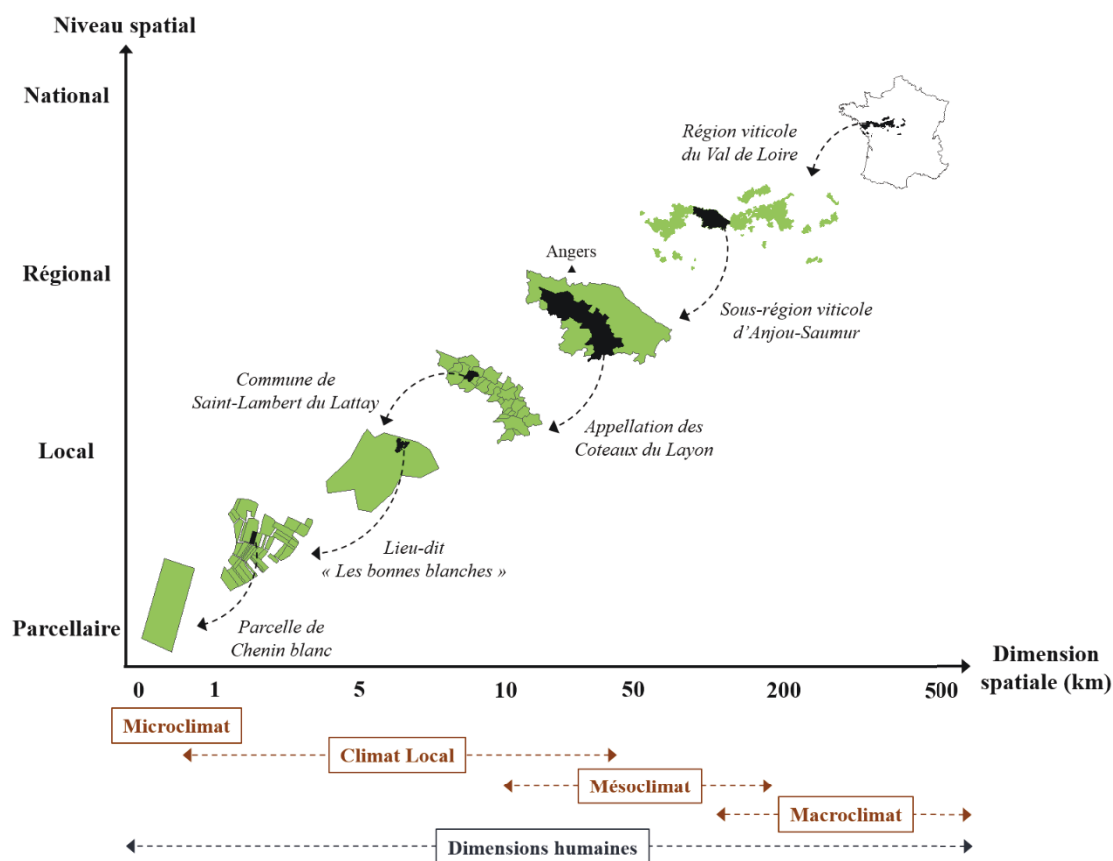


Figure 5 : L'exemple de la représentation schématique des différents niveaux spatiaux de la viticulture en Val de Loire, du niveau national au niveau parcellaire (e.g. parcelle de Chenin blanc).

- Deuxièmement, il faut tenir compte de l'organisation hiérarchique du climat, où des niveaux inférieurs sont imbriqués dans des niveaux supérieurs (Quénol et Bonnardot 2014). La raison de cette organisation est liée au fonctionnement de l'atmosphère. Sachant qu'une même masse d'air générant un même type de temps peut concerner un territoire

étendu, il est certain que sur une entité spatiale plus petite, des caractères communs sont présents (Quénol 2014). Le niveau supérieur fournit, par conséquent, un contexte climatique qui impose des conditions et des contraintes suivant une approche descendante (i.e. *top-down an anglais*) aux niveaux inférieurs (Wu et David 2002 ; Wu 2013). Or, les effets locaux entraînent de fortes variations du climat, qui peuvent être supérieures à la variabilité climatique d'échelles plus étendues (Bonnefoy et al. 2012 ; Quénol 2014), ce qui signifie que les niveaux inférieurs imposent également des conditions et des processus suivant une approche ascendante (i.e. *bottom-up en anglais*). Les caractéristiques individuelles de la vigne sont de ce fait dépendantes des processus environnementaux, ayant lieu à différents niveaux spatiaux.

Cependant, cette description spatiale de la viticulture est rendue plus complexe par des dimensions humaines (Gisbon et al. 2000), qui exercent un rôle déterminant à multi-niveau, du local au global. En effet, le système viticole est un système géré, où le rôle des prises de décisions et des pratiques de gestions est très important (Van Leeuwen et Seguin 2006). Afin de mieux comprendre la complexité spatiale du système viticole, elle est décrite, ci-après, à travers quatre niveaux (i.e. du global au parcellaire). Comme chaque niveau a ses propres attributs, l'objectif est de comprendre quels sont les principaux facteurs qui en émergent (Willis et Whittaker 2002), sachant que plus le niveau s'affine, plus l'hétérogénéité spatiale devient importante (Quénol 2014).

1.2.1. Au niveau global

La vigne est cultivée à travers le globe, sous des conditions environnementales très diverses (Tonietto et Carbonneau 2004 ; Schultz et Stoll 2010). Cette répartition très étendue signifie qu'elle pousse sous une grande variété de climats, allant des climats méditerranéens (e.g. Bassin méditerranéen, Afrique du Sud,...) aux climats continentaux (e.g. Roumanie), océaniques (e.g. Nouvelle Zélande), subtropicaux secs (e.g. Argentine) et humides (e.g. Uruguay), etc. Toutefois, en dehors de quelques exceptions viticoles (Encadré 1.3), les régions productrices de vin se trouvent à peu près entre des latitudes de 30 à 50 degrés, dans les deux hémisphères. Cette répartition géographique de la vigne est façonnée par la variabilité spatiale des conditions macroclimatiques à grande échelle, qui sont fortement déterminées par la variation latitudinale de l'énergie solaire interceptée à la surface de la terre (Ricklefs et Miller 2005 ; De Parcevaux et Huber 2007). L'équateur recevant plus d'énergie solaire au cours de l'année, la température moyenne annuelle diminue avec la latitude, de l'équateur vers les pôles. Ainsi, il apparaît que les conditions macroclimatiques de températures favorables pour la culture de la vigne se situent entre des isothermes annuelles de 10°C à 20°C (De Blij 1983 ; Spellman 1999).

Plus récemment, Gladstones (2004) et Jones (2007) ont indiqué que cette extension viticole est encore mieux représentée par des isothermes moyennes de la saison de croissance de 12°C à 22°C (Figure 6). Jones (2006) a aussi indiqué que la production des vins de haute qualité à partir des cépages les plus reconnus (e.g. Pinot noir, Chardonnay,...) est située entre les isothermes de 13°C et 21°C. Les zones non-viticoles dont la température moyenne saisonnière est inférieure à 12°C (i.e. zones froides), sont ainsi limitées en raison des courtes saisons de

croissance et des faibles sommes d'ensoleillement et de température, ne permettant pas les cépages les plus précoces d'accomplir leur cycle de développement et d'atteindre une maturité adéquate (Carbonneau et al. 2007). Dans ces zones froides, la fréquence et l'intensité accrues des températures extrêmes (e.g. en hiver ou au printemps) rendent également la culture de la vigne très difficile. En revanche, dans des zones dont la température moyenne saisonnière est supérieure à 22°C, la vigne est exposée à des périodes estivales très chaudes, accompagnées par une fréquence élevée des températures caniculaires. Et selon le rythme saisonnier des précipitations, la vigne est d'autre part soumise soit aux conditions très arides (e.g. en Afrique du Nord), soit aux conditions très humides où la pression parasitaire est particulièrement forte. Le développement de la vigne étant très sensible à divers seuils thermiques, la température telle qu'elle est définie par le macroclimat est un facteur décisif de la géographie viticole.

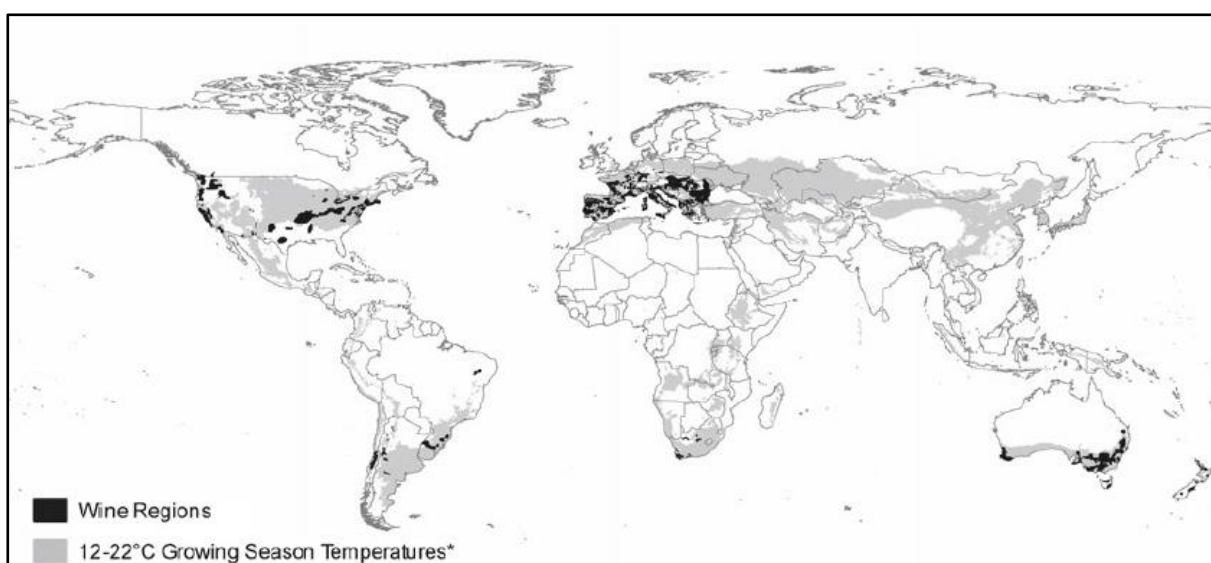


Figure 6: L'étendue géographique des principales régions de production de vin (indiquées en noir) et des surfaces de la terre (indiquées en gris) où la température moyenne de la saison de croissance est située entre 12°C et 22°C pour la période de 1950 à 1999 (Jones et al. 2012).

Encadré 1.3 Vignobles des climats extrêmes

En dehors des limites géographiques de la culture de la vigne, il existe des exceptions viticoles. Rochard et Pérard (2012) ont écrit que « *L'homme a toujours su surmonter les défis de la nature. La vigne témoigne de cette aptitude de l'être humain, de s'affranchir d'un milieu hostile, par son intelligence, sa conviction et l'héritage d'un savoir-faire transmis de génération en génération* ». Dans des régions situées au-delà de l'isotherme de 22°C, les viticulteurs ont développé diverses mesures pour faire face aux contraintes imposées par des températures élevées. Ces conditions sont notamment atténuées en cultivant la vigne à des altitudes très élevées (e.g. en Bolivie, au Kenya), ou si l'approvisionnement en eau est suffisant (Schultz et Stoll 2010). Par exemple, dans la région de Vale do São Francisco (Brésil), le peu de changements saisonniers entraîne des problèmes dans la levée de dormance. Afin de réduire des perturbations physiologiques, la levée de dormance est acquise par la suspension de l'irrigation. Dans d'autres régions, en particulier, les vignobles de

Lanzarote (Espagne), le climat est extrêmement aride (i.e. <150mm/an). Sans la possibilité d'irriguer, chaque cep de vigne est planté au fond d'un trou, protégé par un muret. Le trou permet au cep de vigne de récupérer la rosée du matin qui est absorbée par la cendre volcanique, tandis que le muret protège le cep contre le vent, réduisant ainsi son taux d'évapotranspiration (Gioda 2008 ; Rochard et Pérard 2012). En deçà de l'isotherme de 12°C, on peut aussi y trouver des exceptions, par exemple, la région de Québec (Canada). A part des courtes saisons de croissance et des faibles sommes de températures, les viticulteurs doivent surmonter des températures hivernales extrêmes (e.g. -30°C). Ils emploient ainsi différentes techniques de protection (e.g. buttage au pied, sarment couché au sol,..) ou de sélection variétale. En effet, les variétés de *Vitis vinifera* peuvent supporter des températures jusqu'à -20°C, tandis que des hybrides plus résistantes aux froids, comme Swenson Red (i.e. hybride de *Vitis riparia*) ou Zilga (i.e. hybride de *Vitis amurensis*), peuvent supporter des températures de -35°C et -40°C respectivement.

1.2.2. Au niveau régional

Confrontée à une forte concurrence mondiale et à un secteur en constante évolution, chaque région viticole cherche à se démarquer, en élaborant des vins à forte identité (Newman 1986 ; Hayward et Lewis 2008 ; Easingwood et al. 2011 ; Dougherty 2012). Dans ce contexte d'une production de vin orientée vers la qualité, caractérisée par un trait variétal ou régional distinctif, le cépage cultivé, et en particulier son époque de maturité, doit être en adéquation avec les conditions climatiques du milieu environnant (Jackson et Lombard 1993). Lorsque l'époque de maturité est atteinte trop tard à l'égard des conditions environnantes, Van Leeuwen et al. 2009 soulignent que « *la maturité est insatisfaisante ; les raisins restent acides, peu sucrés, avec des arômes herbacés* », tandis que, atteinte trop tôt « *les raisins sont riches en sucres, peu acides, manquent de potentiel aromatique et donnent des vins déséquilibrés* ». La précocité de maturité de chaque cépage étant mesurable selon ses besoins en chaleur (Parker et al. 2013), une époque de maturité dans des conditions climatiques favorables est généralement atteinte lorsque les cépages sont cultivés à leurs limites septentrionales dans l'hémisphère nord, ou méridionales dans l'hémisphère sud (Jackson 2008). Dans des régions viticoles d'Europe, la culture de la vigne à travers plusieurs siècles a permis de faire émerger les cépages les plus adaptés (Barbeau et al. 2015). Par conséquent, malgré la réglementation en vigueur, contrôlant le choix du cépage dans chaque aire viticole européenne, les cépages cultivés sont généralement localisés dans des climats régionaux qui sont représentatifs des limites septentrionales de leurs possibilités culturelles. Par exemple, en France, le Pinot noir et le Chardonnay, qui sont les cépages emblématiques des vins de Bourgogne, le Cabernet Sauvignon et le Merlot, ceux des vins rouges de Bordeaux, ou encore, le Sangiovese, celui des vins rouges de Toscane (Italie) et le Riesling, celui des vins blancs de Rheingau (Allemagne). A l'inverse, dans des régions viticoles du nouveau monde où la réglementation des cépages autorisés n'existe pas, l'un des principaux enjeux de leur succès et compétitivité viticole a été d'identifier les cépages les plus adaptés (Van Leeuwen et Seguin 2006). Aujourd'hui, on y trouve, par exemple, le Sauvignon blanc, le cépage emblématique des vins blancs de Marlborough (Nouvelle Zélande), le Malbec, celui des vins rouges de Mendoza (Argentine), le Syrah, celui des vins rouges de Hunter Valley (Australie), etc. Dans une région viticole, les principaux cépages cultivés et les styles généraux des vins produits

sont ainsi fortement liés à son potentiel climatique (Tonietto et Carbonneau 2004 ; Jones et al. 2005). A ce titre, l'aptitude variétale est soumise aux attributs des températures actives accumulées en période de croissance. Et pour un même cépage, cultivé dans différents climats régionaux, les propriétés du régime de pluviométrie, des températures pendant la maturation, etc., sont des variables climatiques qui contribuent au trait unique des vins produits (Shaw 2012).

Afin d'évaluer les potentialités climatiques des régions viticoles, ou les comparer, il est donc nécessaire de tenir compte des exigences de la vigne (e.g. besoins thermiques, lumineux, hydrologiques,...). Avec cet objectif, plusieurs travaux de recherches ont abouti à la création des indices agroclimatiques, propres à la viticulture (Encadré 1.4). En intégrant d'une façon ou d'une autre le facteur de température, il existe des indices simples ou plus complexes (i.e. mono-, bi- ou multi-factoriels), et qui, selon les caractéristiques climatiques d'une région donnée, servent à définir : l'aptitude à produire des raisins, l'adaptation des cépages et le déroulement de leurs cycles végétatifs et reproductifs (e.g. l'époque de maturité), les éventuels risques environnementaux (e.g. la sécheresse,...) et le style potentiel des vins à produire (Tonietto et Carbonneau 2004 ; Jones et al. 2012).

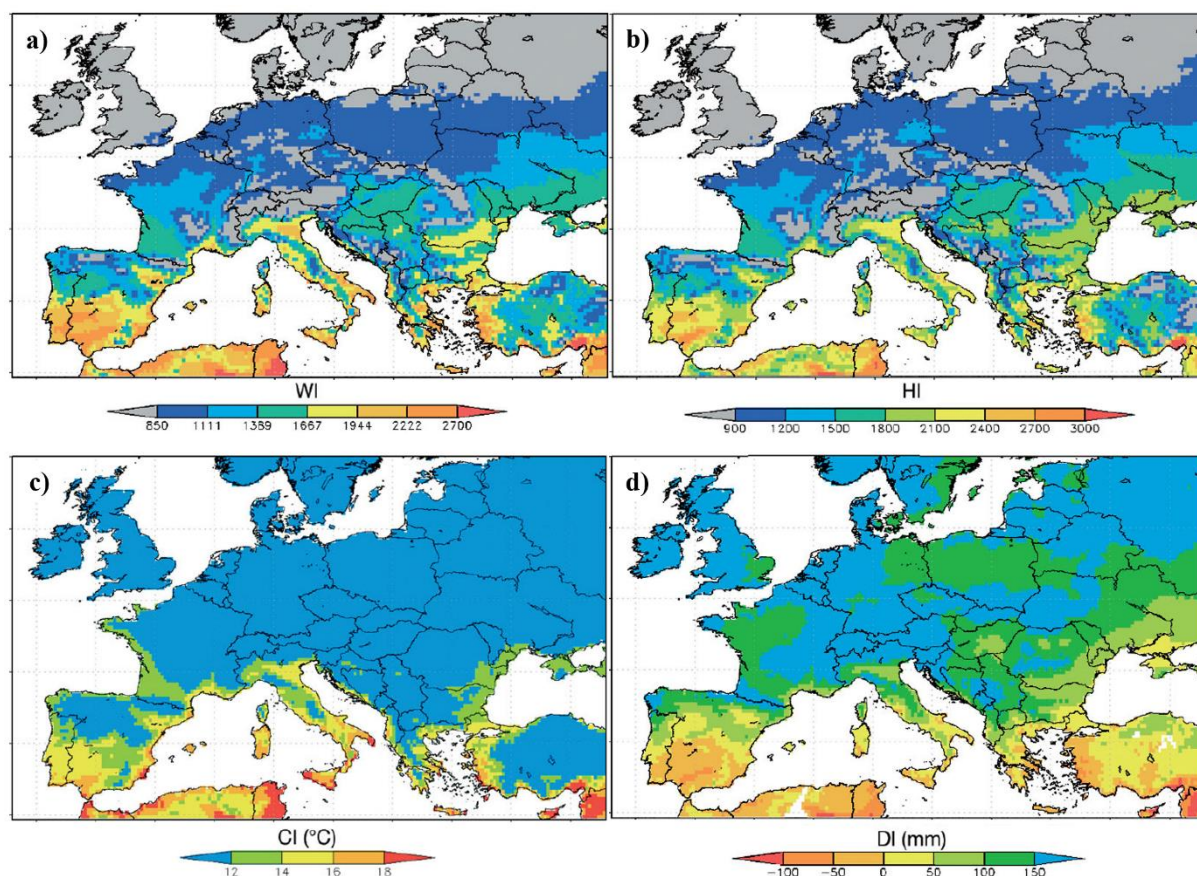


Figure 7 : Les valeurs moyennes de : a) l'Indice de Winkler (*en anglais Winkler Index, WI*), b) l'Indice de Huglin (*en anglais Huglin Index, HI*), c) l'Indice de fraîcheurs des nuits (*en anglais Cold Night Index, CI*), d) l'Indice de sécheresse (*en anglais Dryness Index, DI*), calculées (les valeurs moyennes) à l'échelle Européenne pour la période de 1950 à 2009 (Santos et al. 2012).

Aujourd'hui, l'application de ces indices a permis une meilleure compréhension des variations ou délimitations spatiales des potentialités climatiques. Par exemple, en Australie (Hall et Jones 2010), au Chili (Montes et al. 2012), aux États-Unis (Jones et al. 2010), en Nouvelle-Zélande (Anderson et al. 2012). La Figure 7 montre la variabilité spatiale des potentialités climatiques à l'échelle Européenne (Santos et al. 2012). Entre des régions viticoles, les différences de potentialités climatiques sont essentiellement liées aux effets clés de la position latitudinale, de l'altitude régionale et du degré de continentalité sur des conditions macroclimatiques de températures et de précipitations. Cependant, au sein des régions viticoles, elles sont décrites par les propriétés de l'environnement local (*partie 1.2.3*). Etant développés pour la caractérisation des climats régionaux, et en raison des classes climatiques qui sont trop vastes, l'application des indices agroclimatiques peut présenter certaines limitations, en ne permettant pas de mettre en valeur la forte variabilité climatique qui existe à l'intérieur d'une région viticole (Quénol 2014).

Encadré 1.4 Indices agroclimatiques

D'abord appliqué en Californie et depuis utilisé dans d'autres régions viticoles du monde, l'un des premiers indices propres à la viticulture est l'indice de Winkler (Amerine et Winkler 1944). Basé sur le principe des degrés-jours de croissance, il calcule la somme des températures moyennes journalières au-dessus de 10°C, sur une période de sept mois (Annexe 1). Il estime ainsi le potentiel thermique d'une région donnée. Toutefois, afin de corriger ses possibles lacunes, l'indice de Winkler a subi certaines modifications. Premièrement, sa classification climatique a été améliorée, notamment pour mieux décerner les caractéristiques climatiques dans des régions à climat froid (Jones et al. 2009, 2010 ; Hall et Jones 2010). Il considère désormais six catégories climatiques, allant de la plus fraîche, adaptée aux cépages précoces, à la plus chaude, adaptée aux cépages tardifs. Il compte aussi deux autres catégories, qui indiquent les zones trop froides ou trop chaudes pour la culture de la vigne. Deuxièmement, des modifications ont été apportées à sa méthode de calcul, à titre d'exemple l'indice de degrés-jours biologiquement efficaces, présenté par Gladstones (1992). Cet indice impose une limite supérieure au calcul des sommes de degrés-jours, estimant que lorsque la température moyenne de l'air excède 19°C, la vigne cesse de fonctionner. Il considère aussi la durée d'ensoleillement par l'intégration d'un coefficient de longueur du jour (Hall et Jones 2010). Avec les mêmes objectifs que ceux de Winkler, d'autres indices alternatifs ont été élaborés. Ils sont notamment l'indice héliothermique de Huglin (Huglin 1978), l'indice de température moyenne de saison (Jones et al. 2005), ou encore, l'indice de la température moyenne du mois le plus chaud (Smart et Dry 1980 ; Coombe et Dry 1988), et sa variante améliorée, l'indice de latitude-température (Jackson et Cherry 1988 ; Kenny et Shao 1992). Malgré leurs différences de calcul, ces indices semblent être très corrélés (Jones et al. 2010 ; Hall et Jones 2010), décrivant des informations relativement similaires concernant les potentialités climatiques d'une région viticole.

Afin de mieux comprendre les aspects quantitatifs et qualitatifs du fonctionnement de la vigne, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'incidence thermique sur la composition des raisins. On y retrouve notamment l'indice de qualité de Frégoni (Frégoni 2003) et l'indice de fraîcheur des nuits (Tonietto et Carbonneau 2004). Ce dernier se réfère à la température

minimale moyenne des 30 jours précédant la vendange. D'autres se sont intéressés au composant hydrique, en élaborant des indices plus complexes. Parmi ces indices, les plus utilisés sont : l'indice hydrothermique de Branas (Branas et al. 1946), qui permet d'évaluer le risque potentiel d'une région viticole aux maladies parasitaires, et l'indice de sécheresse (Tonietto et Carbonneau 2004). Ce dernier est adapté du modèle présenté par Riou et al. (1994), permettant de classifier les régions selon leur disponibilité hydrique potentielle. Il convient aussi de mentionner l'indice de Site (Tesci et al. 2001), qui intègre des facteurs physiques du sol (e.g. ratio argile/limons, % de cailloux,...) et des variables climatiques (e.g. température, pluviométrie,...). Enfin, dans le contexte de mieux comprendre les potentialités climatiques des régions viticoles, Tonietto et Carbonneau (2004) ont proposé la classification climatique multicritères (CCM). Structurée sur trois indices différents, mais complémentaires, elle considère des conditions liées à l'accumulation en chaleur (i.e. l'indice de Huglin), à la température lors de la maturation (i.e. l'indice de fraîcheur des nuits) et à l'alimentation hydrique (i.e. l'indice de sécheresse). D'après cette classification, il en résulte 36 types de climats viticoles, qui différencient avec succès le climat de 97 zones productrices, étudiées par Tonietto et Carbonneau (2004).

1.2.3. Au niveau local

Les caractéristiques de l'atmosphère au niveau de la couche limite sont tributaires des conditions de surface (Oke 1987). La morphologie, les aspérités et la nature de la surface telles qu'elles sont définies par le relief, la végétation ou les différentes infrastructures humaines (e.g. les bâtiments, les voies routières, les remblais ferroviaires,...), modifient le comportement des variables météorologiques et caractérisent à terme le climat local (Quénol, 2002). Chaque région viticole est par conséquent constituée de divers climats locaux, présents sur un ensemble de "*petits territoires*". Généralement, le contexte topographique d'un territoire est l'élément le plus influent au niveau local (Quénol 2011). A travers des interactions avec l'atmosphère, les facteurs topographiques (e.g. l'altitude, l'exposition, la pente¹¹,...) conditionnent les échanges de chaleur et d'humidité à la surface de la terre, conduisant ainsi à toute une diversité de climats locaux, appelés les topoclimats (Calame et al. 1977 ; Dumas et al. 1997 ; Jacquet et Morlat 1997 ; Failla et al. 2004 ; Orlandini et al. 2006 ; Bonnefoy et al. 2012). Par exemple, en dehors de certaines exceptions (Encadré 1.5), la température de l'air diminue d'environ 1°C par 150m d'élévation¹² (Guyot 1997). Toutefois, à des échelles spatiales plus fines, la nature du sol et d'autres éléments du paysage, par exemple la proximité d'un lac ou d'une forêt, ont également des impacts importants sur les conditions locales du climat (Figure 8). Quant à la nature du sol, les facteurs physiques (e.g. la texture, la profondeur,...) interagissent avec le topoclimat afin de déterminer des conditions pédoclimatiques (i.e. température et humidité du sol). Ainsi, l'ensemble des éléments du paysage engendrent une forte variabilité spatiale du climat local. Cela explique la variabilité

11 Pour une surface mesurée, la pente correspond à l'angle de son inclinaison par rapport à l'horizontale, alors que l'exposition se réfère à son orientation.

12 Ce phénomène s'explique par la pression atmosphérique qui décroît plus on s'élève en altitude dans l'atmosphère terrestre. Comme la température dépend de cette pression, elle est la plus haute au niveau de la mer où la pression atmosphérique est la plus élevée.

importante des conditions climatiques rencontrée sur des espaces relativement restreints, qui peuvent être dans des milieux avec un relief accidenté, du même ordre de grandeur, voire supérieure, que celle identifiée au niveau régional (Bonney et al. 2012 ; Quéno 2011, 2014).

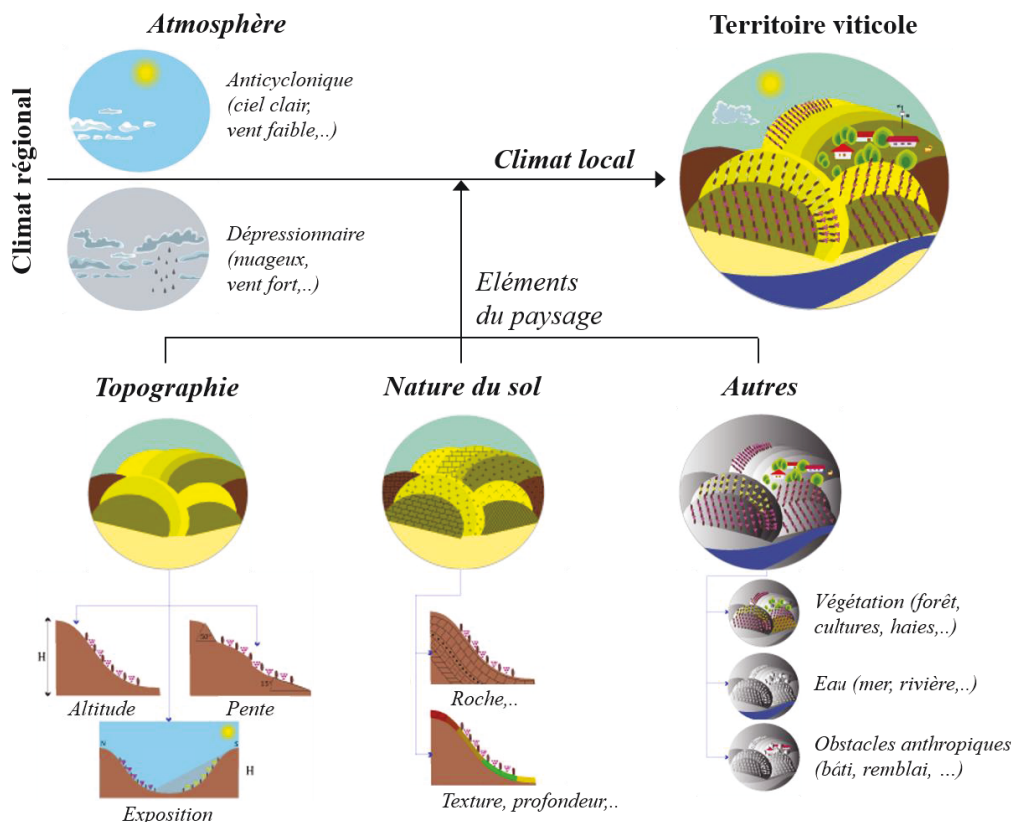


Figure 8 : Principaux facteurs caractérisant la variabilité spatiale du climat local (Quéno 2011)

Au sein d'une région viticole, le climat local constitue de même un facteur clé de la distribution spatiale de la vigne, et plus précisément, de celle des cépages cultivés. Et à pratiques viticoles identiques et pour un même cépage, il induit une forte variabilité spatiale du fonctionnement de la vigne. Ceci a été amplement démontré au cours des études conduites en moyenne vallée de la Loire à la fin du 20^e siècle (Barbeau et al. 2001 ; Morlat 2010). En considérant l'organisation hiérarchique du climat, cette diversité et complexité du climat local se présente ainsi comme un élément critique pour la culture de la vigne, permettant d'atténuer des diverses contraintes climatiques imposées par le climat zonal. Par exemple, dans des régions viticoles à climat très chaud, les effets apportés par l'altitude sont très bénéfiques pour la vigne. Situés en altitude, les vignobles profitent des températures nocturnes plus basses, permettant une maturation lente, une concentration en acidité et arômes plus importante (Miguel-Tabares et al. 2002). L'intensité lumineuse est aussi plus élevée, favorisant la synthèse des composés phénoliques des cépages rouges. Cela concerne, par exemple, les vignobles situés sur les contreforts des Andes, comme la Vallée de Uco (Argentine), entre 1 000m et 1 200m d'altitude, ou la Vallée Centrale de Tarija (Bolivie), entre 1 600m et 2 150m. A l'inverse, dans des régions à climat frais (e.g. Bourgogne, Rheingau,...), il convient de mentionner l'importance de l'orientation et l'inclinaison de la pente, qui améliorent la

réception du rayonnement solaire et réduisent le risque de gel (Huglin et Scheider 1998). Les variations importantes des climats locaux offrent en conséquence aux viticulteurs toute une série de conditions agroclimatiques, et sont nécessaires d'être prises en compte pour la compréhension de la complexité spatiale de la viticulture (Hunter et Bonnardot 2011). En effet, dans le contexte du changement climatique, la connaissance du climat local est un levier d'adaptation (Quénol 2014). L'influence des conditions de surface pouvant engendrer des écarts importants (i.e. notamment pour les températures), l'évolution de la position topographique en fonction des types de cépage, par exemple, pourra être une évolution possible pour s'adapter au réchauffement climatique.

Encadré 1.5 Inversion thermique

Concernant la relation de diminution de la température avec l'altitude, il existe toutefois des exceptions, notamment avec le phénomène d'inversion thermique ; celle-ci étant liée à une combinaison entre l'altitude et la pente. Elle cause une anomalie au gradient habituellement négatif entre la température et l'altitude jusqu'à un certain niveau, appelé le plafond d'inversion (Whiteman 2000). Par temps anticyclonique, lorsque les conditions atmosphériques nocturnes sont caractérisées par un ciel clair et un vent calme (i.e. $<1-2$ m/s), le bilan énergétique au niveau du sol devient négatif¹³ (Quénol 2002). L'air froid, plus lourd et plus dense que l'air ambiant, reste au niveau du sol et forme une couche stable d'air froid. Lors de ce type de refroidissement, la variabilité spatiale des températures est tributaire de la direction et de la vitesse des écoulements gravitaires d'air froid. Ainsi, sur un terrain accentué, l'air froid s'écoule par gravité et s'accumule dans les dépressions ou en amont d'obstacles (Figure 9). Cette forte variabilité spatiale des températures nocturnes est souvent en étroite relation avec la localisation des dommages lors de gelées printanières. Entre les secteurs viticoles les plus froids, situés dans des dépressions, et ceux les plus chauds, situés en altitude, Bonnefoy et al. (2012) ont montré une différence de 4°C à l'échelle d'une petite appellation viticole, alors qu'à l'échelle d'une sous-région viticole, Bonnardot et al. (2011) ont illustré que les températures nocturnes peuvent varier jusqu'à 14°C.

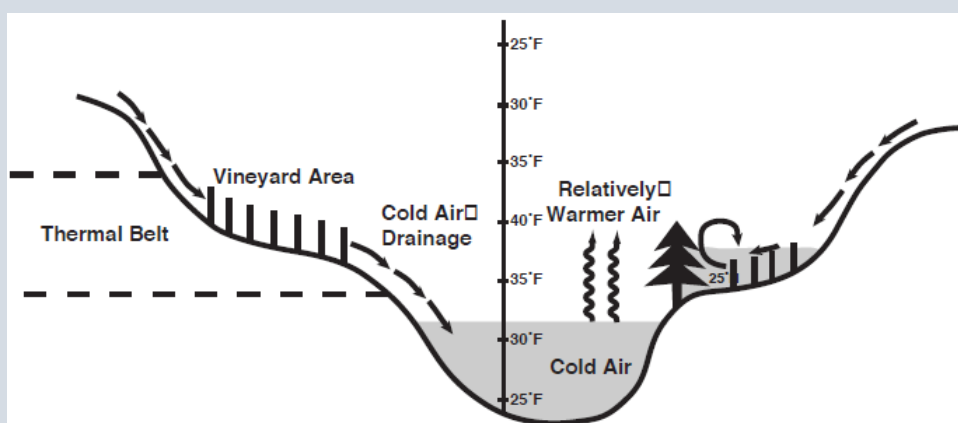


Figure 9 : Ecoulement gravitaire de l'air froid lors d'une inversion thermique (Jones et Hellman 2003).

¹³ Lorsque le rapport entre l'énergie reçue par le sol et l'énergie renvoyée par l'atmosphère est négatif.

1.2.4. Au niveau parcellaire

La vigne est une culture pérenne et nécessite quelques années pour atteindre un bon développement végétatif et reproductif, restant ensuite économiquement productive pendant de nombreuses années (Orlandini et al. 2009). La durée de vie d'une parcelle peut correspondre à deux générations de viticulteurs et pour cette raison, avant la plantation, les décisions prises en termes de pratiques pérennes sont très importantes (Coulon-Leroy et al. 2012). Ces décisions sont étroitement liées à la façon dont les viticulteurs perçoivent conceptuellement les objectifs de production, à savoir, les types de vin qu'ils souhaitent produire (Cadot et al. 2012). Bien que les facteurs du milieu jouent inévitablement un rôle très important (e.g. la topographie environnante, la nature du sol,...), ces objectifs sont aussi conditionnés par beaucoup de facteurs non-climatiques (Belliveau et al. 2006), comme les tendances mondiales de consommation, les régulations de production, la santé humaine, etc. Une production de vin, orientée vers la qualité, nécessite ainsi la prise en compte des facteurs à la fois environnementaux et socio-économiques (Van Leeuwen and Seguin 2006). Selon leurs objectifs de production, les viticulteurs prendront les mesures nécessaires pour mettre en œuvre les pratiques pérennes les plus appropriées, qui devraient favoriser la croissance de la vigne et la maturation des raisins (Coulon-Leroy et al. 2012). Cela concerne le choix du site de plantation, du matériel végétal (i.e. cépage, clone et porte-greffe) et du système de conduite. Dans des régions viticoles d'Europe, un certain nombre de ces pratiques pérennes (e.g. choix du cépage, de la densité de plantation,...), aussi bien celles semi-pérennes¹⁴ et annuelles, sont néanmoins fixées par les cahiers de charge de chaque appellation.

Le climat au niveau parcellaire, à savoir le microclimat, dépend par conséquent de ces choix clés réalisés par le viticulteur. Il est d'une part en fonction des propriétés physiques du site de plantation (i.e. la topographie, la nature du sol,...) et d'autre part en fonction des caractéristiques du système de conduite. En effet, nombreuses sont des études qui montrent les effets, par exemple, de l'orientation des rangs (Hunter et al. 2010, 2016) et du type de palissage (Reynolds et Vanden Heuvel 2009) sur le microclimat de la parcelle (e.g. quantité du rayonnement interceptée, température du feuillage et des grappes,...). Selon le système de conduite choisi, le microclimat environnant influence le taux de croissance végétative, le rendement, les concentrations en sucres, en anthocyanes, en acidités, etc. Le viticulteur intervient ainsi sur les potentialités agronomiques de ses parcelles, en utilisant de bonnes pratiques qui permettent de diminuer les impacts indésirables du milieu physique et d'atteindre ses objectifs de production (Coulon 2012). A titre d'exemple, pour l'appellation des Coteaux du Layon, située dans la région septentrionale du Val de Loire, la notion de précocité est très importante (Encadré 1.6) pour la production des vins liquoreux, issus d'un cépage moyennement tardif (i.e. Chenin). Confrontés par un climat tempéré-océanique et une saison de croissance courte (Quénol et al. 2008), les viticulteurs favorisent des terrains en forte pente, orientés vers le sud et des sols de nature superficielle, dont la réserve en eau est faible. D'autre part, ils sélectionnent des porte-greffes qui améliorent la précocité du cycle végétatif (e.g. Riparia Gloire, 101-14 Mgt,...). Ces pratiques pérennes conduisent par conséquent à un débourrement précoce, un décalage du cycle végétatif et reproductif vers une

14 Pratiques fixées pour plusieurs années mais peuvent être modifiées (Coulon-Leroy et al. 2012)

période de l'année plus favorable (i.e. où la durée du RPA est plus longue) et une époque de maturité précoce, qui devrait favoriser la surmaturation des raisins (Barbeau et al. 1998). C'est pourquoi, dans l'espace, la prise de décision humaine telle qu'elle est raisonnée au niveau parcellaire, rend le système viticole très complexe.

Encadré 1.6 La précocité¹⁵

La notion de précocité est très importante en vignobles septentrionaux (e.g. Bourgogne, Champagne, Val de Loire,...). Dans ces vignobles, elle est fortement liée à la qualité des raisins puisqu'elle est positivement corrélée avec la teneur en sucre et négativement corrélée avec l'acidité totale à la vendange (Barbeau et al. 1998 ; Asselin et al. 2001). Tout d'abord, la précocité est une fonction de la caractéristique génétique du matériel végétal (i.e. cépage et porte-greffe). Ensuite, elle dépend du pédoclimat thermique au niveau des pics racinaires dans la première partie du cycle de croissance (i.e. de débourrement à floraison) (Morlat et Hardy 1986 ; Morlat et Jacquet 1993), puis de l'expression végétative et du potentiel de vigueur au cours de la seconde partie du cycle (i.e. de nouaison à maturité) (Barbeau et al. 1998). La précocité est appréhendée à travers l'étude de l'apparition des principaux stades phénologiques. Ainsi, chaque parcelle observée peut être caractérisée par un indice de précocité, à savoir, de débourrement, floraison et véraison, et par un indice global de précocité, l'indice de cycle. Ce dernier peut être appréhendé à partir des dates des principaux stades phénologiques. Les recherches successives menées en Val de Loire ont de fait abouti à la construction de deux indices (Morlat et al. 1997 ; Barbeau et al. 1998). La corrélation entre les deux en ce qui concerne les dates considérées et leurs indices respectifs, est supérieure à 98 %. Barbeau et al. (1998), sur la base d'une absence de relation entre la date de débourrement et la date de véraison, proposent un indice de précocité de cycle $iPcy$ incluant uniquement les stades de floraison et véraison. Il apparaît que ces stades constituent des indicateurs fiables de la précocité de cycle. La formule prend en compte la précocité à la floraison et la durée de la période mi-floraison à mi-véraison : $iPcy = iPf + 100 * [(Vm - Fm) - (Vi - Fi)] / (Vm - Fm)$. En effet, les dates de mi-floraison et mi-véraison sont toujours les stades phénologiques qui sont d'une part les mieux corrélés entre eux et qui, d'autre part, expliquent le mieux la composition des baies à maturité. A eux seuls, ils représentent un bon compromis pour caractériser le cycle de la vigne.

1.3. La dynamique temporelle de la viticulture

Comme décrit pour la complexité spatiale, la notion d'échelle temporelle est également fondamentale en viticulture. A long terme, les attributs physiques d'une parcelle donnée (e.g. composante géo-pédologique, environnement paysager,...) conditionnent son potentiel viticole. Ceci peut se traduire selon deux variables écophysiologiques, le potentiel de précocité et de vigueur (Bodin et Morlat 2006 ; Coulon-Leroy et al. 2012), et qui vont, à pratiques identiques,

¹⁵ Cette partie est prise de Quénol (2014).

être à l'origine de différences en termes de qualité et de typicité des vins obtenus¹⁶ (Morlat 2010). Les pratiques pérennes s'y superposent et déterminent par la suite, la notion de potentiel vendange. Ces pratiques entreprises à la plantation agissent ainsi d'un paramètre de fonctionnement, exerçant un rôle à long terme (Figure 10). Dans ce contexte, les pratiques pérennes permettent de diminuer ou d'amplifier la précocité ou la vigueur telles qu'elles ont été conférées par les facteurs physiques du milieu (Barbeau 2008 ; Coulon 2012). Toutefois, la manière dont le potentiel vendange se réalise dans le temps, dépend essentiellement de deux paramètres de fonctionnement : le climat de l'année¹⁷ et les pratiques annuelles de gestion viticoles et œnologiques.

Le climat de l'année, bien connu comme l'effet millésime, intervient sur la vigne à travers ses caractéristiques saisonnières. Selon leurs moyennes ou sommes, et leurs répartitions en fonction le développement végétatif et reproductif de la vigne (Carbonneau et al. 2007 ; Morlat 2010), les différents facteurs climatiques¹⁸ et leurs variables associés (e.g. l'alimentation hydrique) caractérisent la précocité et la vigueur de la vigne. Et en raison de leurs impacts sur le comportement de la vigne, elles déterminent fortement le rendement et la composition de la vendange (Van Leeuwen et al. 2004 ; Ubalde et al. 2007). De manière générale, des conditions plus chaudes et sèches que la moyenne induisent un comportement de vigne plus précoce et une vigueur plus faible, avec des raisins plus riches en sucres, en anthocyanes et en composés phénoliques, et des concentrations en acide malique plus faible. Selon leurs seuils, les facteurs climatiques, notamment la température de l'air, exerce également une influence très importante. Par exemple, la température de l'air assure un bon fonctionnement à la floraison, où sa durée est favorisée par des températures entre 20°C et 30°C (Carmo Vasconcelos et al. 2009). Cependant, une période prolongée des températures basses (i.e. <15°C), interfère avec la pollinisation et la fécondation, provoquant ainsi des phénomènes de millerandage et de coulure, qui sont associées avec une perte de rendement (Jackson 2008). D'autres exemples sont des épisodes de gels printaniers tardifs (e.g. 1991, 2008,...) ou de grêle (e.g. 2016), qui sont très néfastes. Les conditions climatiques d'un millésime a ainsi des impacts décisifs sur le potentiel vendange, en termes de quantité et qualité, mais également sur la notion de potentiel œnologique, puisque les attributs qualitatifs des vins sont liés aux caractéristiques biochimiques des raisins (Cadot et al. 2012). En effet, il existe une forte corrélation entre les caractéristiques climatiques de l'année et les niveaux de qualité des vins produits (Grifoni et al. 2006 ; Sadras et al. 2007 ; Baciocco et al. 2014). Ces effets clés sur les aspects quantitatifs et qualitatifs de production indiquent la forte sensibilité de la vigne aux variations climatiques et pour cette raison, toute modification du climat à long terme en termes des conditions de moyennes et d'extrêmes peut apporter des défis importants à la viticulture.

16 Ces trois groupes de variables ont été mis en évidence par l'Unité Vigne et Vin de l'INRA d'Angers dans des parcelles d'étude situées en moyenne Vallée de la Loire.

17 La variabilité saisonnière du climat est liée aux interactions atmosphériques et océaniques à grande échelle (e.g. Oscillation Nord Atlantique, El Niño Southern Oscillation) (Jones et al. 2012)

18 Les principaux facteurs climatiques sont présentés dans la partie 1.1

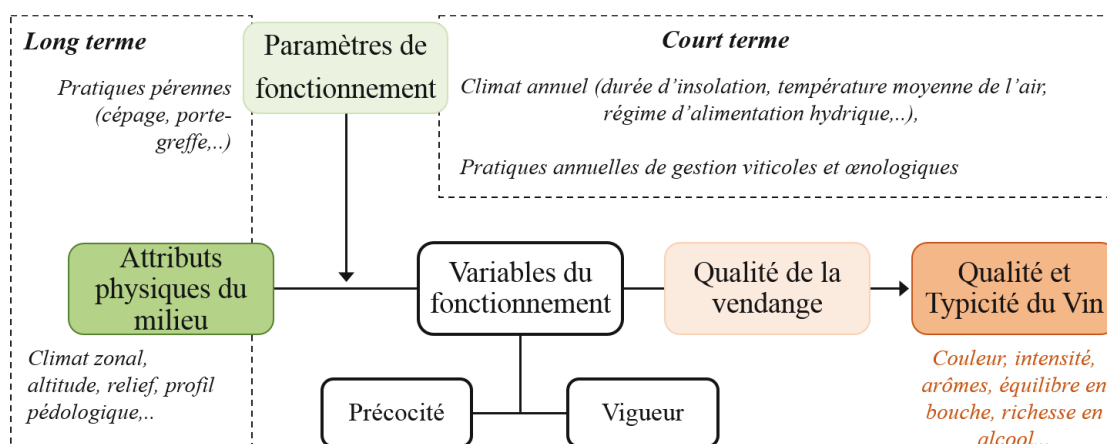


Figure 10 : Représentation temporelle des différents facteurs qui agissent sur les variables écophysologiques de la vigne et par la suite, sur la qualité et la typicité des vins produits.

Les viticulteurs sont confrontés depuis toujours à la forte variabilité climatique des différentes années de production (Morlat 2010). Le rythme saisonnier de la vigne étant conditionné par le climat annuel, les viticulteurs interviennent constamment, par exemple à travers des pratiques liées à la gestion de la vigueur (i.e. entretien du sol, rognage, effeuillage,...), ou à la gestion de la pression phytosanitaire (Jackson et Lombard 1993 ; Hunter et al. 2010 ; Coulon-Leroy et al. 2012). A travers ces interventions, les viticulteurs cherchent ainsi à optimiser le fonctionnement de la vigne en adaptant un itinéraire technique approprié à chaque parcelle. Dans ce contexte, Coulon-Leroy (2014) explique que pour une parcelle donnée « *il peut exister plusieurs types d'itinéraire technique, suivant les conditions climatiques de l'année* » et ceci se traduit par des qualités de raisin différentes. Par ailleurs, « *un même type de raisin peut être obtenu avec divers types d'itinéraire technique. L'effet des facteurs du milieu peut être contrebalancé par l'effet d'une pratique (ex. la vigueur peut être diminuée par la mise en place d'un enherbement très concurrentiel)* ». Au cours de la période maturité, les viticulteurs suivent de très près l'évolution de la composition des raisins, en attendant une certaine qualité de la matière première qui va déterminer le potentiel œnologique. Dans cette perspective, les viticulteurs vont chercher à exprimer au mieux les qualités de leur vendange dans les vins qu'ils souhaitent produire, en mettant en œuvre une gestion œnologique appropriée (Barbeau 2008).

Les viticulteurs gérant continuellement des enjeux environnementaux et socio-économiques multiples, leur prise de décision est par conséquent dynamique où ils effectuent diverses formes et types de mesures autonomes en ajustant leurs pratiques préexistantes (Figure 11). Ceci est un processus itératif, qui suit plusieurs étapes (Klein et al. 1999). La première étape consiste à recueillir des informations, telles que la qualité de la vendange ou le type de vin réellement obtenu, qui vont amener les viticulteurs à reconsidérer leurs objectifs de production et l'adaptation de leurs pratiques, à savoir annuelles ou pérennes (Coulon-Leroy 2012). Elles impliquent aussi l'évolution des facteurs externes (e.g. tendances mondiales de consommation,...). L'étape suivante consiste à concevoir une réponse appropriée qui dépend de nombreux facteurs décisifs (Klein et al. 1999). Il s'agit, par exemple, de la faisabilité technique, économique ou juridique des initiatives d'adaptation identifiées. Les deux dernières

étapes concernent respectivement la mise en œuvre et l'évaluation, permettant des corrections et des améliorations, avant que les viticulteurs apportent un ajustement permanent à leur pratique préexistante. Dans le contexte du changement climatique, la compréhension de cette dimension dynamique des activités viticoles devient extrêmement importante afin de mieux évaluer la vulnérabilité future de la viticulture.

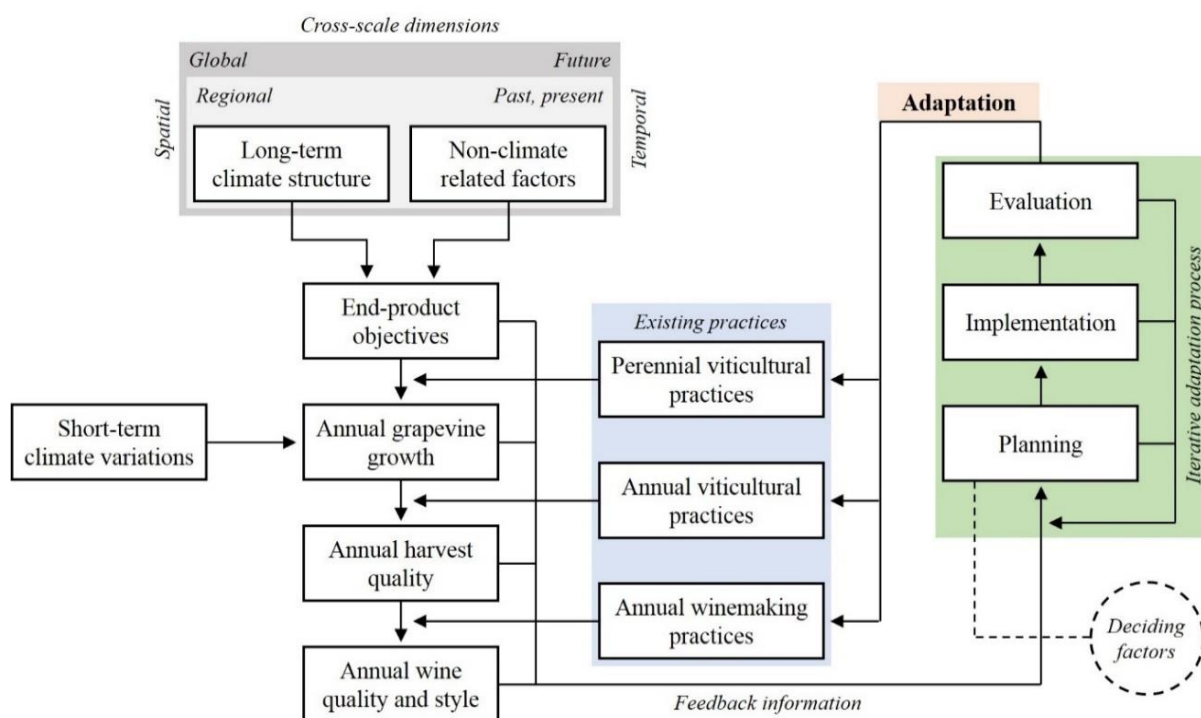


Figure 11 : Illustration des dimensions spatiales et temporelles de la viticulture.

CONCLUSION

A travers les régions viticoles, il n'existe pas une niche climatique « idéale » pour la culture de la vigne. A l'inverse, le climat interagit avec les facteurs physiques du milieu, en exerçant une influence importante sur la vigne, qui est d'autre part maîtrisée par le viticulteur. La conjugaison de ces différents facteurs abiotiques, biotiques et anthropiques, impriment à la vigne un mode de fonctionnement particulier, et « *cette harmonie qui existe entre la plante, le terrain, le climat, voire une culture* » correspond à la notion de terroir (Barbeau 2008). Selon les disciplines et les pays, la notion de « terroir viticole » varie, ce qui explique les difficultés de l'OIV à proposer une définition commune à tous les pays membres. D'après eux, le terroir vitivinicole se définit comme « un concept qui se réfère à un espace sur lequel se développe un savoir collectif des interactions entre un milieu physique et biologique identifiable et les pratiques vitivinicoles appliquées, qui confèrent des caractéristiques distinctives aux produits originaires de cet espace. Le terroir inclut des caractéristiques spécifiques du sol, de la topographie, du climat, du paysage et de la biodiversité » (OIV 2010). Cette notion apparaît ainsi d'une grande richesse permettant de décrire la qualité et la typicité des vins produits selon une chaîne d'influences qui vont du sol jusqu'aux méthodes œnologiques employées. Avec le changement climatique, la notion même de terroir pourrait être remise en question (Quénol 2014). Pour permettre à la profession de s'adapter suffisamment tôt à cette nouvelle

donne climatique et de limiter l'impact économique du changement climatique, il est nécessaire d'employer une méthodologie adaptée au fonctionnement de l'agrosystème viticole qui détermine le terroir (Quénol 2014). Il apparaît donc nécessaire d'employer une approche systémique pour étudier et caractériser un terroir viticole. Dans ce cas, il s'agit donc d'étudier le climat à l'échelle des terroirs viticoles en fonction des différents facteurs environnementaux (sol, climat local, etc.) et humains (i.e. choix et pratiques culturels) qui le caractérisent et en fonction de leurs interactions.

CHAPITRE 2

Le changement climatique et la viticulture

INTRODUCTION

A travers le temps, le climat, et en particulier la température de surface, a toujours varié (Beltrando 2004). A l'échelle des temps géologiques, les enregistrements paléoclimatiques¹⁹ révèlent une succession d'époques glaciaires et interglaciaires (Petit et al. 1999 ; Lüthi et al. 2008). Ces enregistrements illustrent également l'alternance de périodes chaudes et froides durant les deux derniers millénaires (Jones et al. 2001 ; Mann et al. 2008 ; Büntgen et al. 2011). Cependant, lorsque ces changements climatiques ont eu lieu, de manière significative et à grande échelle, l'histoire montre que les impacts ont été considérables sur la vie sur terre (Alley et al. 2003 ; Rial et al. 2004). Par exemple, l'hémisphère nord a connu une période relativement chaude du 10^e au 13^e siècle, appelée l'optimum climatique médiéval, suivie par une période de refroidissement du 15^e au 19^e siècle, appelée le petit âge glaciaire. Entre ces deux périodes, le basculement climatique a fortement marqué la géographie et la santé humaine, la productivité agricole, aussi bien que la prospérité des vignobles aux latitudes élevées (Mann 2002a, b).

Aujourd'hui, il existe diverses preuves qu'un changement climatique est en cours, ayant déjà de nombreux effets sur des systèmes physiques, biologiques et humains (GIEC 2014). En comparaison aux évolutions passées du climat, influencées par des perturbations naturelles, le changement actuel se différencie par ses causes aussi bien par le rythme et l'ampleur de ses modifications climatiques (Karl et Trenberth 2003 ; GIEC 2013). Tout d'abord, ce chapitre a pour but de présenter la base scientifique du changement climatique. A cet effet, l'évolution récente du climat est placée dans son contexte historique afin d'illustrer la nature des changements en cours et la contribution des causes anthropiques. De même, les tendances futures du climat seront présentées. Dans un second temps, le chapitre se focalise sur le changement climatique et la viticulture, dans le but de montrer les évolutions climatiques et agronomiques qui sont déjà perceptibles dans des régions viticoles, suivie d'une brève discussion concluant sur les impacts attendus sur la viticulture.

¹⁹ Les enregistrements paléoclimatiques sont des proxies climatiques permettant de visualiser le climat sur des longues périodes de temps (i.e. centenaires, millénaires,...). Ils sont basés sur des indicateurs sensibles aux variations climatiques, en particulier les variations de température, telles que l'épaisseur d'un cerne de croissance d'arbre, la composition isotopique de divers éléments dans la glace, la composition chimique d'une bande de croissance de corail, ou les données issues des dossiers historiques, par exemple, les dates de vendanges.

2.1. Le changement climatique

Lorsque l'on considère le changement climatique, il convient de distinguer la météo du climat (Beltrando 2004), afin de donner un sens plus précis à ce qu'on entend par « changement climatique ». Dans un espace donné, la météo fait référence aux conditions atmosphériques rencontrées sur des courtes périodes de temps (e.g. horaires, journalières,...) ; elle correspond ainsi à l'état de l'atmosphère à un instant donné. Inversement, le climat se réfère aux conditions météorologiques constatées sur plusieurs années, généralement sur 30 ans²⁰. Fondé sur une description statistique des moyennes et de la variabilité des variables atmosphériques (e.g. la température moyenne, la pluviométrie totale,...), le climat concerne l'état de l'atmosphère à des échelles de temps plus longues. Comparé à la météo, le climat est plus complexe, puisque l'état de l'atmosphère à long terme est sensible au fonctionnement du système climatique de la Terre. Par conséquent, en raison de la nature dynamique de ce système, le climat est également soumis à des variations temporelles. A l'échelle saisonnière ou annuelle, elles font référence à la variabilité climatique, alors qu'à l'échelle allant de plusieurs décennies à de milliers d'années, l'évolution graduelle d'un type du climat à un autre désigne un changement climatique. D'après le GIEC, un changement climatique est « *une variation de l'état du climat que l'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période* ». Avec pour objectif de focaliser sur le changement climatique, à savoir, les caractéristiques temporelles et spatiales des évolutions en cours, il semble tout d'abord essentiel de présenter le système climatique de la Terre, permettant de mieux comprendre comment le climat est régulé et altéré dans le temps.

2.1.1. Le système climatique

Comme l'indique Cautenet et al. (2014), le système climatique est un système constitué de différentes composantes : l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la cryosphère²¹. A ces composantes physiques, s'ajoute également la biosphère qui concerne tous les organismes vivants, compris les humains²². Activé par le rayonnement solaire, le fonctionnement du système climatique est régi par des interactions (i.e. physiques, biologiques, chimiques) entre les différentes composantes qui ont pour rôle de compenser les disparités spatiales de la quantité d'énergie reçue à la surface de la Terre. Dans ce contexte, l'atmosphère et l'hydrosphère, c'est-à-dire les deux fluides, ont un rôle clé. Chacune ayant un comportement spécifique, elles réagissent temporellement différemment au flux d'énergie. Par exemple, l'atmosphère répond rapidement (i.e. jours à semaines), alors que pour l'hydrosphère, les eaux de surface répondent plus lentement (i.e. mois à années) et les eaux profondes extrêmement lentement (i.e. centaines d'années). Toutes ces interactions, à la fois dans l'espace et dans le

20 Comme défini par l'organisation météorologique mondiale.

21 La cryosphère peut être considérée comme un sous-ensemble de l'hydrosphère, mais pour des raisons, tels que l'effet albédo élevé de la surface des glaces, la cryosphère fonctionne comme une composante individuelle, mise à part dans le système climatique.

22 Ils peuvent être définis dans un sous-ensemble distinct de la biosphère, appelé l'anthroposphère.

temps, rendent le système climatique très complexe et dynamique. Son fonctionnement est schématisé dans la Figure 12.

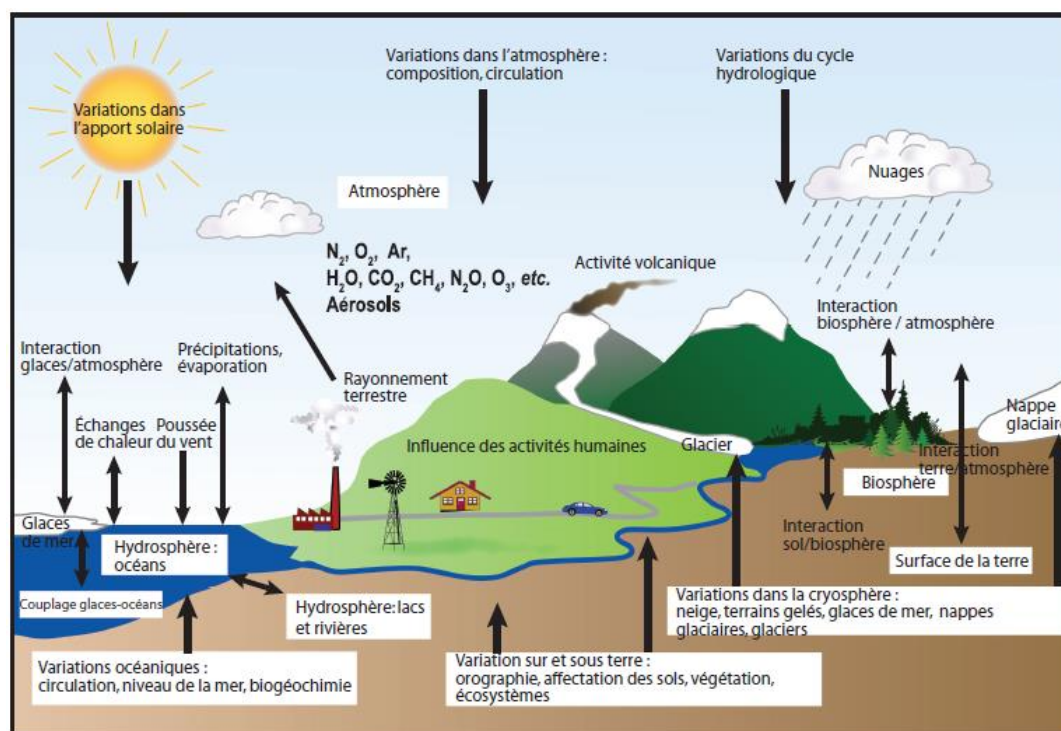


Figure 12 : Représentation simplifiée des différentes composantes du système climatique, leurs processus et interactions (GIEC 2007).

Toute modification apportée au système climatique, qui perturbe la quantité d'énergie entrante ou sortante du système, provoque un changement climatique (e.g. augmentation ou refroidissement des températures globales). En effet, le système climatique est en équilibre énergétique, appelé bilan radiatif de la Terre, et cet équilibre peut être modifié de trois façons (GIEC 2007), à savoir une variation dans : i) l'énergie solaire atteignant la Terre, ii) la fraction réfléchie du rayonnement solaire, iii) les concentrations de gaz à effet de serre (GES). A l'origine de ces modifications on trouve des perturbations naturelles telles que l'activité solaire ou les éruptions volcaniques, appelées forçages externes²³ du système climatique. Au même titre que ces phénomènes naturels, les activités humaines sont aussi considérées comme un forçage externe (Trenberth et Stepaniak 2004). Alors que certains travaux scientifiques, comme celui de Ruddiman (2005a, b), démontrent l'impact des activités humaines, dites « *anthropique* », sur le climat bien avant la révolution industrielle. Ce n'est réellement que depuis le milieu du 19^e siècle que leurs impacts ont contribué de manière significative à l'évolution climatique (GIEC 2007). Les activités humaines, en particulier celles liées à l'exploitation des ressources fossiles (e.g. charbon, pétrole,...) et la déforestation, modifient la composition chimique de l'atmosphère et de ce fait, ont contribué à intensifier l'effet de serre naturel (Encadré 2.1). A l'aide des archives paléoclimatiques, permettant de comprendre la dynamique de l'atmosphère sur des périodes très longues, les différents rapports du GIEC

23 Une action qui agit sur l'état d'équilibre du système dynamique, en perturbant son bilan énergétique.

montrent que les concentrations de GES dans l'atmosphère sont restées à peu près stables dans le temps (Figure 14). Or, depuis le milieu du 19^e siècle, elles sont en constante augmentation. A ce titre, le 5^e rapport d'évaluation de GIEC (2013) souligne que « *l'influence humaine sur le système climatique est sans équivoque. Elle est évidente en ce qui concerne l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le forçage radiatif positif, le réchauffement observé, et la compréhension du système climatique* ». C'est ainsi pour cette raison qu'en comparaison aux évolutions passées du climat, le changement climatique actuel se différencie, en étant attribué à la variation naturelle du climat et à l'augmentation des émissions de GES, liée aux activités humaines. La Figure 13 illustre que le réchauffement global observé depuis le milieu du 19^e siècle est seulement reconstitué lorsque les modèles climatiques intègrent des forçages naturels et anthropiques.

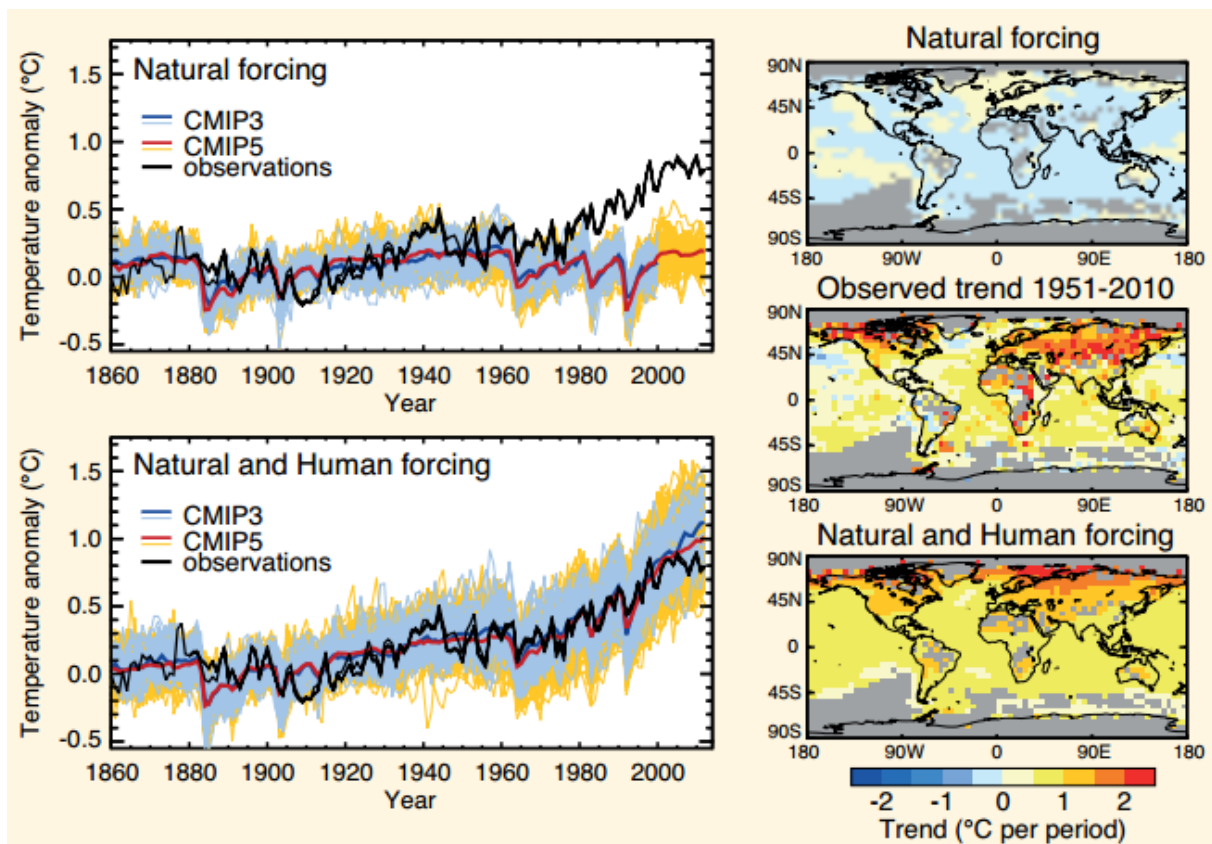


Figure 13 : Comparaison des changements globaux de température observés et ceux simulés en utilisant les forçages naturels et anthropiques (GIEC 2013)

Encadré 2.1 Effet de serre

Le soleil active le système climatique en émettant de l'énergie sous la forme de rayons de courtes longueurs d'onde vers la terre (GIEC 2007). Lorsque ce rayonnement atteint la couche atmosphérique de la Terre, l'énergie solaire connaît plusieurs trajectoires. Une partie (i.e. environ 30%) est renvoyée dans l'espace, en étant réfléchi (i.e. effet albédo) par l'atmosphère (e.g. les nuages, les aérosols,...) ou la surface terrestre (e.g. neige, déserts,...). L'atmosphère joue ici un rôle de « filtre », par l'intermédiaire de son enveloppe gazeuse entre le soleil et la surface terrestre (Bonnefoy 2013). Les deux tiers d'énergie restants sont absorbés par la terre

et les océans qui émettent un rayonnement infrarouge en fonction de leur réchauffement (i.e. des rayons de grandes longueurs d'onde). C'est ensuite les gaz à effet de serre (GES), présents dans l'atmosphère, qui absorbent et réfléchissent de nouveau ce rayonnement infrarouge vers la terre. Sans l'effet de serre la température moyenne de la terre serait établie autour de -18°C au lieu de 15°C . Les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), la vapeur d'eau (H_2O) et l'ozone (O_3). A l'inverse, les deux gaz prédominants, l'azote et l'oxygène ne génèrent pratiquement pas d'effet de serre. Par ailleurs, les nuages agissent comme un écran, semblable à celui qui est produit par les gaz à effet de serre, mais cette opacité est compensée par le pouvoir de réflexion des nuages qui ont plutôt tendance à refroidir le climat (GIEC 2007). Liés aux activités humaines, les concentrations des GES ont beaucoup augmenté pendant l'ère industrielle (i.e. depuis le milieu du 19^e siècle) (Figure 14). En raison de leurs propriétés d'absorption du rayonnement infrarouge émis par la terre, une augmentation des concentrations des GES signifie que plus des rayons infrarouges sont absorbés et piégés, ce qui modifie le bilan radiatif de la Terre. Le 5^{ème} rapport du GIEC (2013) conclut que « *Les activités humaines, notamment l'usage des énergies fossiles, a conduit à une hausse exceptionnelle de la concentration des gaz à effet de serre transformant le climat à un rythme jamais vu par le passé* ».

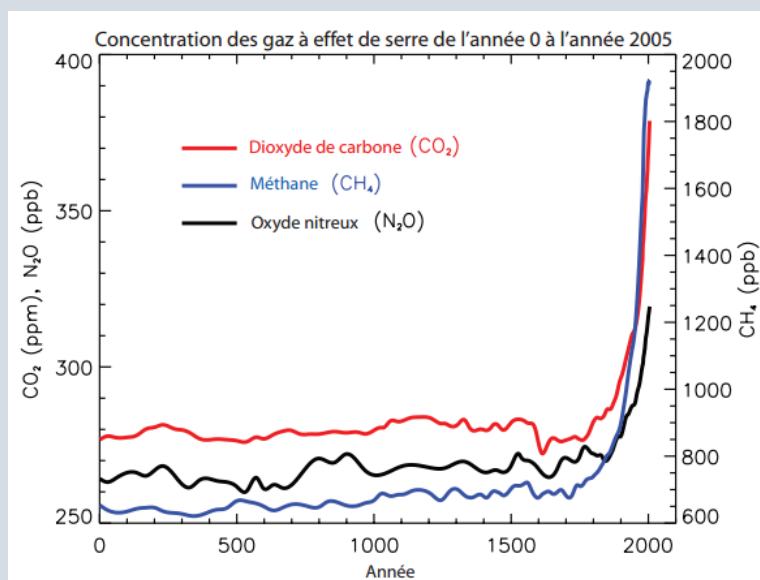


Figure 14 : Evolution des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone (CO_2), du méthane (CH_4), de l'oxyde nitreux (N_2O) (GIEC 2007).

2.1.2. Les changements observés à l'échelle planétaire²⁴

L'accentuation de l'effet de serre par l'augmentation des concentrations atmosphériques de GES, engendre un bilan radiatif positif de la Terre. En raison de ce déséquilibre énergétique (Trenberth et al. 2009, 2014; Von Schuckmann et al. 2016), de nombreux changements sont en cours dans le système climatique. Aujourd'hui, il existe plusieurs sources de données²⁵

²⁴ Cette partie a été adaptée du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (2013)

²⁵ Elles sont issues des mesures directes (e.g. stations météorologiques, satellites,...) et indirectes (i.e. les archives paléoclimatiques).

permettant de reconstituer les conditions climatiques du passé afin de comprendre la nature de ces évolutions (i.e. leur vitesse et leur ampleur). Afin de comprendre le changement climatique, il est important de se pencher sur l'évolution de variables liées aux différentes composantes du système climatique, par exemple, l'atmosphère (e.g. température, précipitation, vent,...), l'hydrosphère (e.g. niveau de la mer, température des océans), la cryosphère (e.g. couverture neigeuse), etc. D'après GIEC (2013), « *le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté* ». Cette partie portera maintenant uniquement sur deux des variables de la composante atmosphère, à savoir, l'évolution de la température de l'air et des précipitations.

2.1.2.1. La température de l'air

Les preuves du changement climatique sont les plus évidentes à travers l'évolution des températures. La température moyenne mondiale (i.e. terre et océans) a augmenté de 0.85°C entre 1880 et 2012 (GIEC 2013). A l'aide des enregistrements régionaux suffisamment exhaustif (1901-2012), la Figure 15a met en évidence que le réchauffement concerne le quasi globalité de la surface de la planète. Dans l'espace, l'augmentation la plus importante est relevée dans les latitudes hautes de l'hémisphère nord. De plus, cette augmentation n'a pas eu lieu de manière linéaire, et elle a notamment connu une forte accélération à partir du milieu du 20^e siècle, « *chacune des trois dernières décennies a été successivement plus chaude à la surface de la Terre que toutes les décennies précédentes depuis 1850* » (GIEC 2013). La dernière décennie (2001-2010) a été la plus chaude de toutes les décennies depuis 1850 et la période de 1983 à 2012 a probablement été la plus chaude depuis 1400 ans.

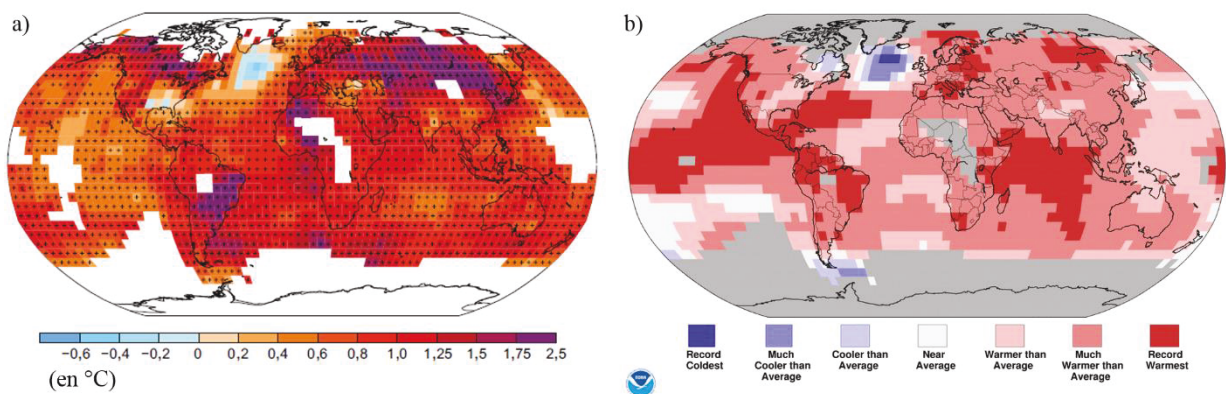


Figure 15 : a) Evolution observée des températures moyennes en surface entre 1901 et 2012 (GIEC 2013) et b) Carte des températures enregistrées en 2015, indexées par rapport aux plus chaudes et aux plus froides relevées depuis 1880.

Notons que l'année 2015 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée (Hansen et al. 2016), qui a déjà été observé en 2014 (Blanchet 2015), et que 2016 est bien partie pour dépasser 2015 (Figure 15b). La NOAA explique ces records de température du fait d'un épisode El Niño intense et du réchauffement climatique. En effet, l'évolution de la

température moyenne mondiale présente toujours une forte variabilité naturelle aux échelles annuelles et décennales, mais qui est caractérisée par un réchauffement considérable à long terme.

2.1.2.2. Les précipitations

L'évolution des précipitations au cours du 20^e siècle a été très variable dans le temps et l'espace. En effet, les différentes séries de données disponibles depuis le début du 20^e siècle indiquent la nature non-uniforme des changements de précipitations, qui sont caractérisés finalement par des tendances régionales et des évolutions plus ou moins marquées selon la période considérée (Figure 16). D'une manière générale, les précipitations ont augmenté de 5 à 10% au niveau des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Au niveau subtropical, les précipitations ont connu une baisse moyenne de 3% (Figure 16). Plus précisément, les précipitations ont fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le nord de l'Europe et dans le nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles ont diminué au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud (GIEC 2013). En France, les précipitations présentent des tendances d'évolution aussi contrastées, mais généralement à la hausse (Moisselin et al. 2002). L'indice de sécheresse de De Martonne présente des hausses faibles, sauf au sud de la France où se dessine une accentuation de la sécheresse.

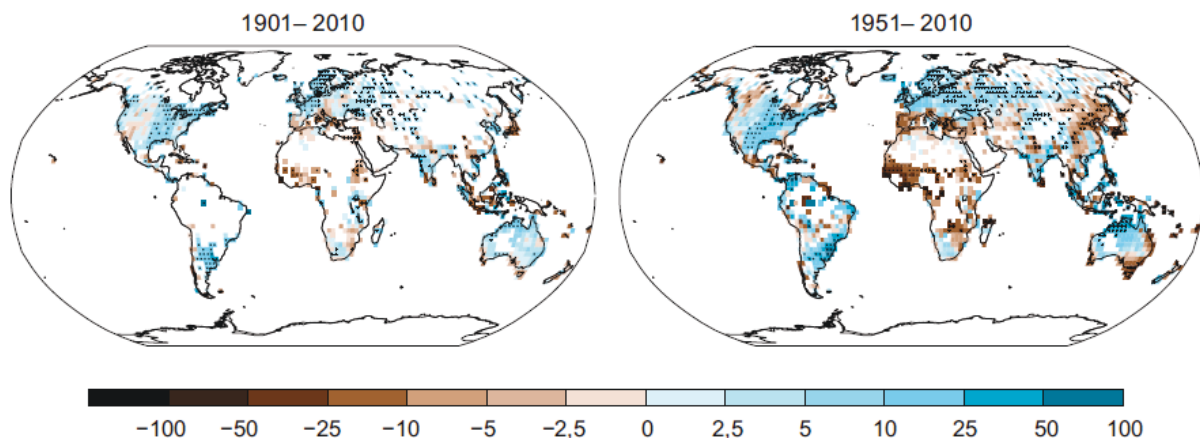


Figure 16 : Tendances observées des précipitations annuelles mondiales entre 1901 et 2010, et entre 1951 et 2010 (GIEC 2013).

2.1.2.3. Extrêmes de température et de précipitations

L'évolution actuelle de la température de l'air (i.e. réchauffement) et des précipitations (i.e. augmentation/diminution) a naturellement un impact sur les phénomènes climatiques extrêmes comme les vagues de chaleur, les sécheresses et les fortes précipitations. Même s'il est difficile de voir une augmentation significative de ces phénomènes en relation avec le changement climatique actuel, les tendances futures mettent en évidence une modification de la fréquence et de l'intensité de ces phénomènes extrêmes (Figure 17). Depuis les années 1950, ces modifications sont généralement caractérisées par une diminution du nombre de journées et de nuits froides, une augmentation du nombre de journées et de nuits chaudes. En raison des journées plus chaudes, la fréquence des vagues de chaleur a fortement augmenté

sur une grande partie de l'Europe, de l'Asie et de l'Australie (GIEC 2013). Concernant les extrêmes de précipitations, il est probable que le nombre d'épisodes de précipitations abondantes a augmenté plutôt que diminué. Toutefois, comme pour les précipitations, le changement des extrêmes de précipitations est également marqué par une forte variabilité spatiale.

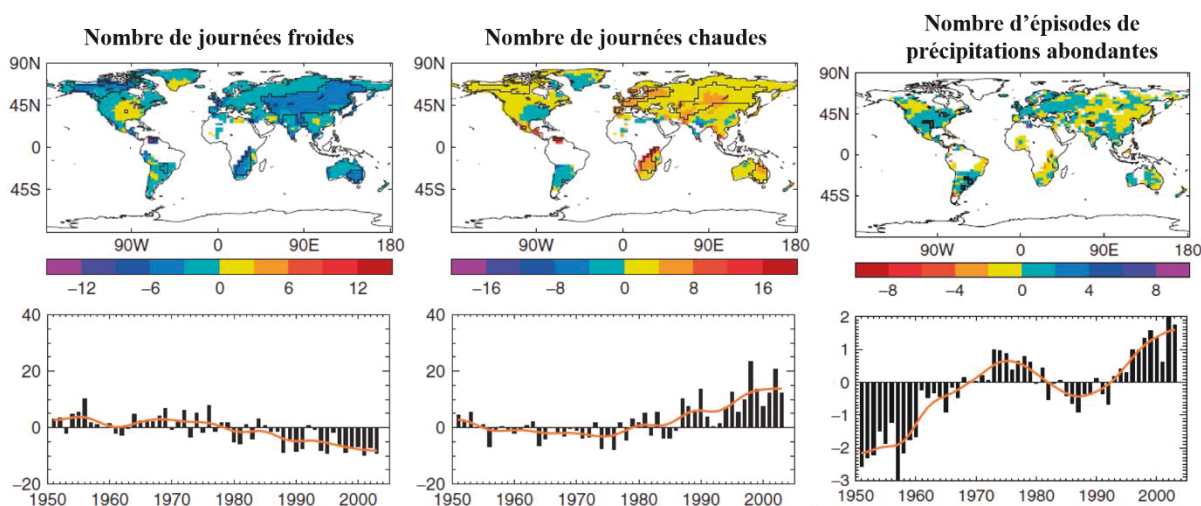


Figure 17 : Evolution des nombres de journées froides, chaudes et d'épisodes de précipitations abondantes à l'échelle planétaire (Zhang et al. 2011)

2.2. La tendance future du changement climatique

Le changement climatique et ses effets étant déjà perceptibles sur des systèmes physiques, biologiques et humains (Figure 18), il est intéressant de comprendre la tendance future du climat. Bien qu'il reste encore certaines incertitudes dans la compréhension du système climatique, et en particulier comment il répondra à des niveaux de gaz à effet de serre plus élevés, des projections climatiques sont nécessaires pour comprendre les impacts attendus. Celles-ci permettront également d'encadrer les efforts d'atténuation et d'adaptation.

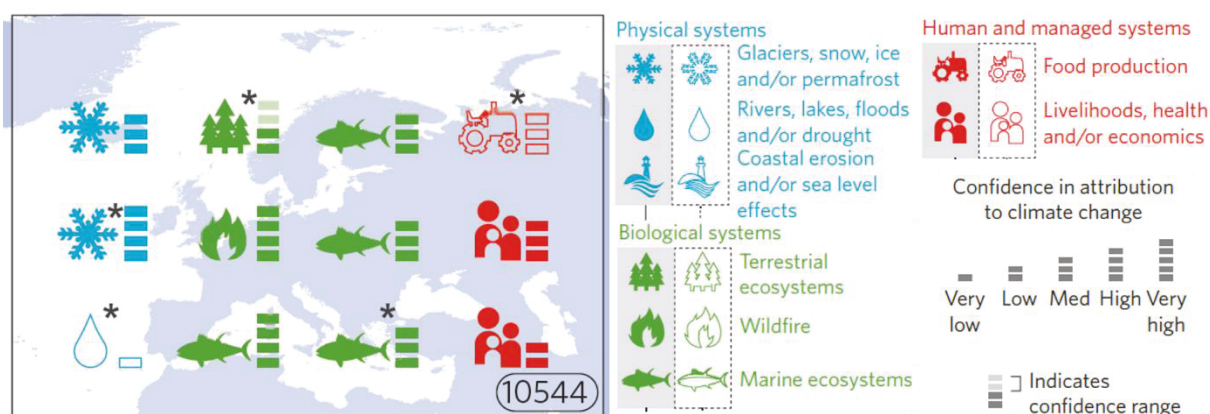


Figure 18 : Impacts observés du changement climatique en Europe (adaptée de Hansen et Cramer 2015)

2.2.1. Modélisation du climat futur à l'échelle planétaire

Il existe une large disponibilité de modèles de circulation générale (i.e. *en anglais GCM*) permettant de fournir des scénarios sur l'évolution future du climat. Ces modèles sont élaborés à l'échelle de la planète en fonction de divers scénarios d'émissions de GES en relation avec différentes configurations socio-économiques et politiques. Ce sont des programmes informatiques complexes utilisant des équations mathématiques pour simuler le fonctionnement du système climatique, aussi bien du passé que du futur (Cautenet et al. 2014).

Dans le rapport d'évaluation de GIEC en 2001, des scénarios d'émissions ont été élaborés (Figure 19). Ce rapport, appelé « Special Report on Emissions Scenarios » (SRES) était composé de 4 grandes familles de scénarios (i.e. A1, B1, A2, B2), plus ou moins optimistes. Dans le cinquième rapport du GIEC (2013), de nouveaux scénarios ont été présentés (Moss et al. 2010 ; Van Vuuren et al. 2011a ; Rogelj et al. 2012). Ces scénarios, appelés « Representative Concentration Pathways » (RCP) sont composés de scénarios d'émissions élevées et faibles de GES. Contrairement aux SRES, les RCP prennent en compte la volonté de certains pays de mettre en place une politique d'atténuation. En résumé, ils correspondent à : RCP 2.6 a une trajectoire qui atteint un pic ($\sim 3\text{W/m}^2$, $\sim 490\text{ ppm CO}_2$) et puis décline avant 2100 ; RCP 4.5 et RCP 6.0 ont des trajectoires de stabilisations après 2100 ; RCP 8.5 a une trajectoire croissante, qui devrait atteindre un forçage radiatif de $> 8.5\text{W/m}^2$ en 2100 (i.e. $\sim 950\text{ ppm}$ de CO_2). De plus, ces scénarios vont jusqu'en 2300, ce qui les rend plus pertinents pour les questions d'atténuation (Meinshausen et al. 2011). Les RCP ont été établis à partir de 23 modèles climatiques (i.e. dans le cadre du projet CMIP5). Ces nouvelles simulations ont été considérablement améliorées grâce à de meilleures capacités de calcul et à la diminution des incertitudes (Knutti et Sedláček 2012). Comme l'indique Cautenet et al. (2014), la concordance avec la température mesurée sur la période 1900-2000 montre que ces modèles sont globalement réalistes.

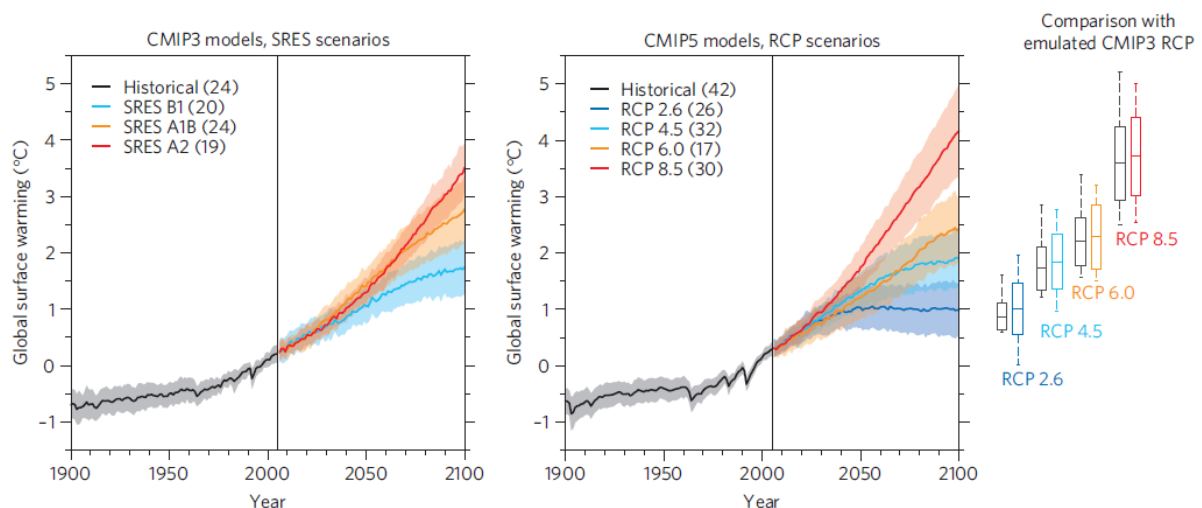
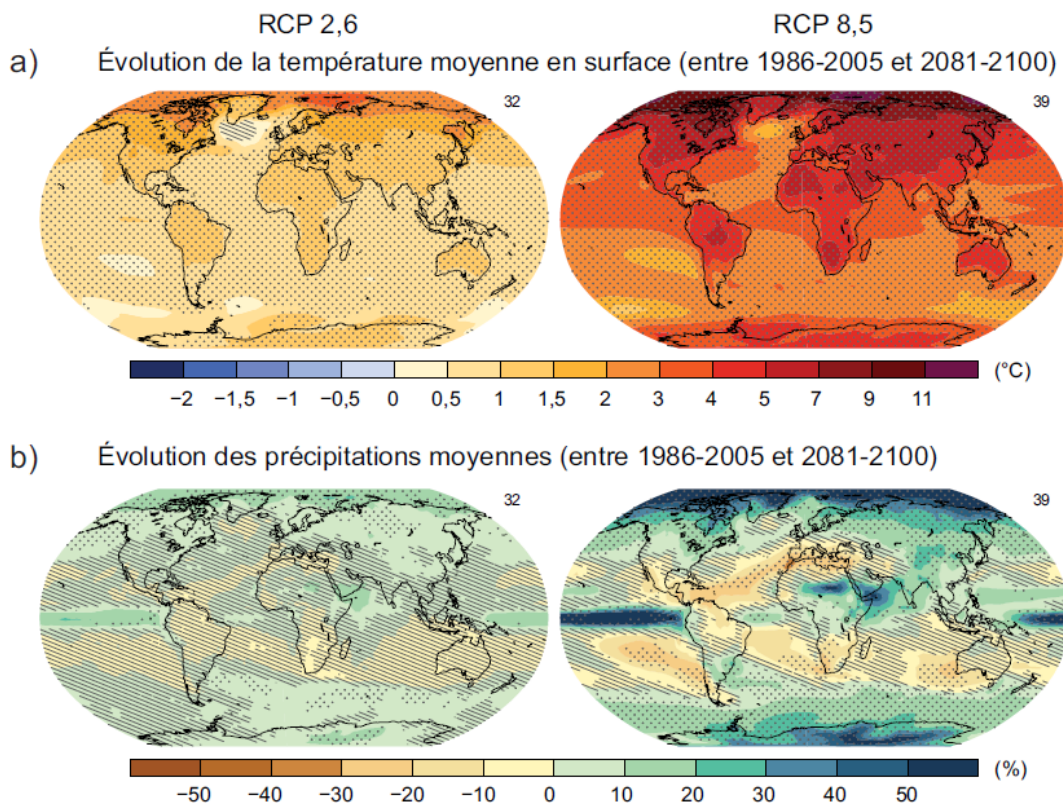


Figure 19 : Relativement à la période de référence (1986-2005), les projections de la température mondiale selon les scénarios SRES (CMIP3) et les scénarios RCP (CMIP5) (Knutti et Sedláček 2012)

La Figure 19 montre que d'après les trajectoires des différents scénarios RCP, le réchauffement va se poursuivre au cours du 21^e siècle. Relativement à la période de référence (1986 à 2005), l'augmentation des températures moyennes à la surface du globe pour la période de 2081 à 2100, sera probablement dans les plages de : +0.3°C à +1.7°C (RCP2.6), +1,1°C à +2.6 °C (RCP4.5), +1.4 °C à +3.1°C (RCP6.0) et +2.6°C à +4.8°C (RCP8.5) (GIEC 2013). Par conséquent, selon la trajectoire du scénario le plus optimiste (RCP 2.6), la hausse des températures devrait rester en dessous du seuil de 2°C en 2100 (i.e. le seuil considéré comme critique concernant les impacts attendus). A l'inverse, si les émissions de gaz à effet de serre (e.g. CO₂) continuent au même rythme qu'à présent, le scénario de RCP 6.0 et en particulier celui de RCP 8.5 prévoit une forte augmentation de la température, dépassant le seuil de 2°C. De même, le réchauffement continuera à présenter de la variabilité interannuelle à décennale. En effet, de nombreux climatologues s'accordent pour dire que le changement climatique sera vraiment notable après 2030, où des modifications majeures du climat général prendront alors le pas sur la variabilité interannuelle (Meehl et al. 2009 ; Solomon et al. 2011 ; Hawkins et Sutton 2012).



Figures 20 : Cartes des moyennes multimodèles CMIP5 pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 sur la période 2081–2100 pour : a) l'évolution de la température moyenne annuelle en surface, b) l'évolution moyenne en pourcentage de changements des précipitations moyennes annuelles (GIEC 2013).

La figure 20 montre que le réchauffement attendu ne sera pas uniforme d'une région à l'autre, où l'Arctique se réchauffera plus rapidement que l'ensemble du globe et le réchauffement sera plus important à la surface des continents qu'à la surface des océans (GIEC 2013). Au niveau des précipitations, tout comme la tendance observée au 20^{ème} siècle,

il existe une grande variabilité temporelle et spatiale. Les scénarios illustrent que la moyenne annuelle des précipitations augmentera dans les hautes latitudes alors qu'elles diminueront dans les régions subtropicales arides. Enfin, ces changements sont attendus d'être accompagnés par une hausse de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes : pluies diluviennes, journées de forte chaleur, épisodes de grêle, etc.

Dans le cadre des simulations du changement climatique, la complexité des modèles et surtout les temps de calcul que ceux-ci demandent, font que, actuellement, ce sont les modèles globaux qui sont utilisés. Cependant, la résolution spatiale, relativement importante « *les scénarios RCP ont une résolution de 0.5° de latitude et de longitude (grille de 50 km de côté environ)* » est trop approximative, notamment pour des études d'impacts et d'adaptation. Cela conduit au développement de techniques de désagréments d'échelles et l'application de modèles régionaux afin de simuler des données climatiques à des échelles spatiales et temporelles plus pertinentes.

2.2.2. Vers une modélisation adaptée aux études d'impact du changement climatique²⁶

Comme mentionné ci-dessus, les modèles climatiques globaux ne disposent pas d'une résolution suffisamment fine pour des études d'impact à échelles plus fines. Voilà pourquoi de nombreux travaux abordent la réalisation de modèles capables de désagréger le signal climatique global vers l'échelle régionale. Les modèles régionaux de circulation de l'atmosphère (RCM), ou des modèles de méso-échelle ont des résolutions plus fines que les modèles globaux, de l'ordre de quelques kilomètres.

Les RCM visent à régionaliser les sorties de modèles globaux en utilisant l'emboîtement des grilles de modèles de niveaux croissants de résolution. La première grille est ainsi forcée à ses frontières par les champs atmosphériques à basse résolution, souvent des modèles climatiques globaux, alors que la dernière grille contient les données avec la meilleure résolution. Ces fines grilles représentent la circulation régionale des modèles de l'atmosphère. Avec l'amélioration de la résolution des sorties du modèle, la topographie, la végétation, les caractéristiques de l'hydrographie et des sols sont mieux prises en compte. Météo France utilise le modèle ARPEGE-Climat comme modèle global, qui a une résolution variable de 50 km sur la Méditerranée (Déqué et al. 2007). Pour désagréger le signal ARPEGE, le modèle régional ALADIN est utilisé pour obtenir une résolution de 10 km. A l'échelle de l'Europe, le programme EuroCordex permet d'obtenir des données modélisées à l'échelle de l'Europe avec une résolution de 10-12 km (Vautard et al. 2013, ...). Le développement de ces modèles a fortement augmenté ces dernières années grâce à la capacité de calcul accrue des ordinateurs qui permet des améliorations à la fois dans leur résolution et la complexité.

L'utilisation de la modélisation RCM permet une désagrémentation scalaire à partir de modèles globaux, mais avec la nécessité de capacité de calcul importante, il est difficile d'obtenir des résultats satisfaisants à une échelle très fine. L'imbrication des différents phénomènes atmosphériques en termes de chevauchement d'échelles (du global au local) rend ce type de modélisation difficilement applicable à un niveau d'échelle très fin. Pour pallier à cette

26 Cette partie a été adaptée de Cautenet et al. 2014

difficulté, des méthodes statistiques peuvent être utilisées. Ces méthodes sont basées sur l'établissement de la relation entre les caractéristiques de surface (e.g. topographie, occupation du sol,...) et les variables climatiques mesurées par l'intermédiaire des réseaux de stations et de capteurs météorologiques. Dans ce type d'étude, l'existence d'un lien entre les éléments climatiques et les caractéristiques topographiques est ensuite évalué spatialement en utilisant un système d'information géographique (SIG) (Madelin 2004). La modélisation numérique RCM et la modélisation statistique des données climatiques présentent des avantages et des inconvénients spécifiques mais elles sont complémentaires. La modélisation numérique à méso-échelles permet de prendre en compte les conditions atmosphériques d'échelle synoptique ainsi que l'imbrication des échelles, mais elle se révèle difficilement utilisable aux échelles fines, à cause notamment des temps de calcul qu'elle implique et de problèmes de paramétrisation. La modélisation statistique multicritère présente l'avantage d'être adaptée aux échelles locales, mais ses résultats n'apportent qu'une explication partielle, car le modèle est statique.

2.3. Le changement climatique et la viticulture

Avant la fin du 20^e siècle, peu de travaux avaient concerné le changement climatique et la viticulture. Il convient de mentionner les précurseurs : Dry (1988), Smart (1989), Kenny et Harrison (1992), Bindi et al. (1996) ou Bonnardot (1996), qui a mis en évidence les conséquences du réchauffement climatique sur le cépage Pinot noir, cultivé en Bourgogne. A partir des années 2000, la communauté scientifique de la filière viticole a commencé à prendre conscience de l'enjeu de cette problématique et s'est intéressé à l'évolution du climat et ses effets sur le fonctionnement de la vigne et la composition du raisin (Jones and Davis 2000 ; Schultz 2000 ; Seguin et de Cortazar 2004 ; Duchêne et Schneider 2005 ; Jones et al. 2005). Ce n'est réellement que depuis dix ans que des études sont conduites de façon systématique dans de nombreux vignobles du monde (e.g. Webb et al. 2008 ; Ramos et al. 2008 ; Bock et al. 2011 ; Tomasi et al. 2011 ; Koufos et al. 2014). Celles-ci ont contribué à l'élaboration du constat actuel de la viticulture dans le contexte du changement climatique, les principales idées de ce constat :

- A travers les régions viticoles, le changement climatique se traduit essentiellement par un réchauffement²⁷, avec des variations spatiales dans sa vitesse et son ampleur.
- Aucune modification des précipitations n'a été constatée. Mais le régime d'alimentation hydrique a évolué, résultant d'une plus grande variabilité interannuelle de la pluviométrie et de sa répartition temporelle, ainsi que d'une hausse des taux d'évapotranspiration.
- En raison du réchauffement, les conditions thermiques sont plus favorables pour le fonctionnement de la vigne dans des vignobles septentrionaux. Le réchauffement a également conduit à l'apparition des nouvelles régions viticoles (e.g. en Suède).

27 Dans certaines régions, par exemple, Marlborough (NZ), aucune modification dans la moyenne n'a été détectée (Sturman et Quénot 2013).

- A l'inverse, certaines régions viticoles (e.g. en Europe du Sud, en Amérique du Nord, en Australie,..) ont atteint, voire dépassé leur optimum thermique pour les cépages actuellement cultivés.
- La hausse des températures moyennes de la saison de croissance a conduit à une forte augmentation des indices bioclimatiques (Figure 21), ce qui a impliqué une modification importante des classifications des types de climats viticoles.
- La majorité des cépages étudiés mettent en évidence une avancée des stades phénologiques (débourrement, floraison, véraison) et de la date du début des vendanges. Cette avancée est accompagnée par une augmentation de la biomasse et une évolution de la composition des raisins (i.e. caractérisée par augmentation de la teneur en sucre et baisse de l'acidité totale).

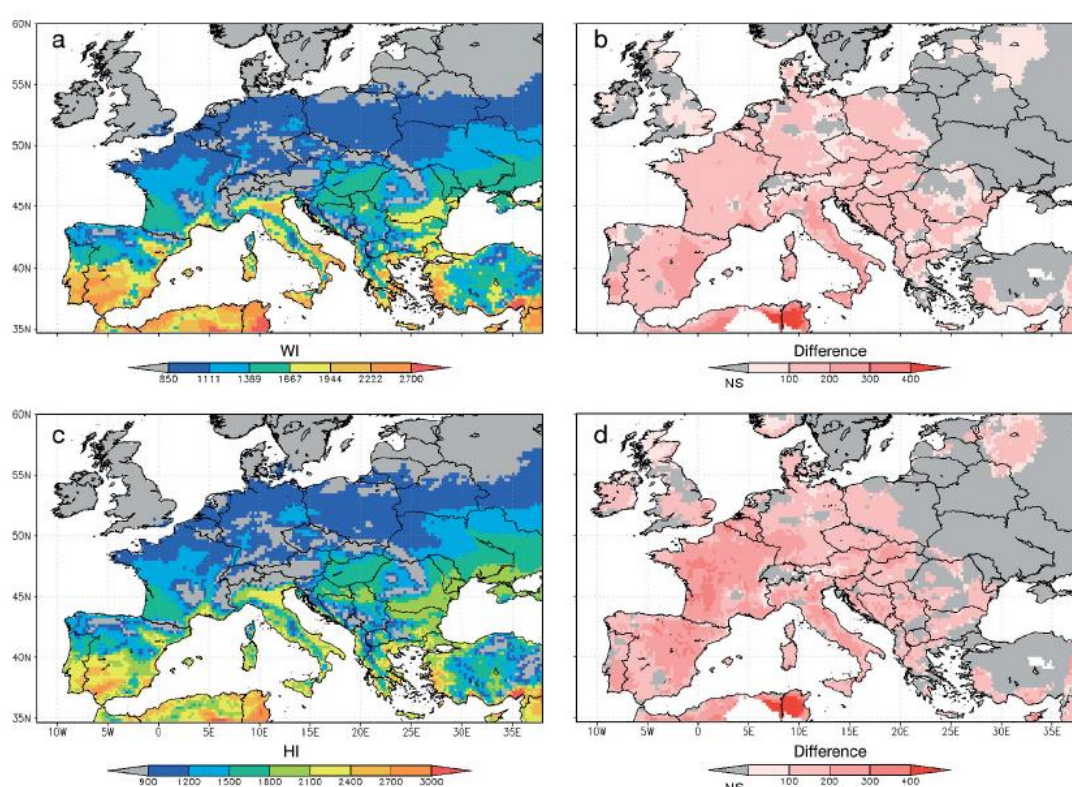


Figure 21 : Cartographie des indices de Winkler et de Huglin en Europe pour la période de 1950 à 2009 (à gauche), et la différence entre les périodes de 1980-2009 et 1950-1979 (Santos et al. 2012)

2.3.1. Le cas du Val de Loire²⁸

Le Val de Loire, situé dans le nord-ouest de la France et qui s'étend de Nantes à Sancerre, est caractérisé par un climat océanique à tendance septentrionale (Joly et al. 2010). La température moyenne de la saison de croissance, entre 1960 et 2010, en Val de Loire²⁹ était de 16.1°C. Pendant cette période, les températures ont significativement évolué. Bonnefoy et al.

²⁸ Cette partie est adaptée de Neethling et al. (2011, 2012).

²⁹ Calculée à partir de 6 stations météorologiques de Météo France (Nantes, Angers, Saumur, Tours, Romorantin, Bourges).

(2012) ont démontré, pour plusieurs stations situées en Val de Loire, l'existence d'une rupture³⁰ dans l'évolution de la température. L'année 1987 a été déterminée comme une année de rupture pour les séries de températures maximales de toutes les stations en Val de Loire. En effet, entre la période pré-rupture (1950-1987) et post-rupture (1988-2010), l'augmentation de la température maximale a été de +0.8°C à Nantes à +1.3°C à Saumur. En revanche, pour les séries de températures minimales, l'année de rupture est plus changeante suivant les lieux, allant de 1980 à Nantes ou Angers à 1993 à Poitiers. Bonnefoy (2013) indique que « *l'origine climatique de la rupture a notamment été associée à des changements dans l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO)* ».

Si l'augmentation de la température n'a pas été uniforme dans le temps, elle a également évolué différemment à l'échelle des différents sous-bassins du Val de Loire. Cette analyse subrégionale montre un réchauffement plus important des températures minimales sur la façade océanique ainsi qu'un gradient ouest-est pour l'augmentation des températures maximales. Ainsi, la température moyenne de la saison de croissance a augmenté de +1.4°C à Nantes, de +1.8°C à Angers de +1.8°C à Saumur, de +1.7°C à Tours, de +1.3°C à Romorantin et de +1.8°C à Bourges, pour la période de 1960 à 2010. L'augmentation de la température n'a pas non plus été uniforme entre les saisons. Bien que les températures aient augmenté de façon significative pour chaque saison, toutes les stations étudiées indiquent que c'est la température estivale (i.e. période de juin à août) qui a augmenté le plus fortement. Le nombre de jours pendant lesquels la température maximale était entre 25°C et 30°C, et supérieure à 30°C a augmenté de façon significative.

L'évolution des précipitations a été plus complexe. Aucun changement significatif de la pluviométrie globale annuelle n'a été observé. Cependant, la fréquence des printemps et/ou étés secs a tendance à augmenter, ainsi que l'alternance d'années sèches et d'années humides consécutives (Barbeau 2007).

Le réchauffement se reflète davantage sur l'évolution des indices bioclimatiques. En effet, l'indice de Huglin a augmenté significativement de 1960 à 2010 pour l'ensemble des locations étudiées en Val de Loire. La Figure 22 illustre l'évolution pour 4 stations météorologiques, qui ont évolué d'un climat « frais », vers un climat « tempéré », qui correspondait alors à celui de Bordeaux il y a 30 ans.

La figure 22 illustre qu'en 2003, l'indice de Huglin, par exemple de Saumur était bien situé dans un climat « tempéré chaud ». En conséquence, la Syrah et le Tempranillo ont réussi à atteindre une bonne maturité sur le domaine expérimental de l'INRA à Montreuil-Bellay cette année-là. Les raisins de Syrah ont été vendangés à une teneur en sucre de 205 g/L (12,2°alc.) et une acidité totale de 4,1 g/L. Par ailleurs, les raisins de Tempranillo ont été vendangés à une teneur en sucre de 192 g/L (11,4°alc.) avec une acidité totale de 3,5 g/L. Vu que les températures doivent continuer à augmenter au cours du 21^e siècle en France, les cépages tardifs seront en mesure d'atteindre une bonne maturité, comme en 2003.

30 Discontinuité temporelle dans les séries climatiques, détectée statistiquement

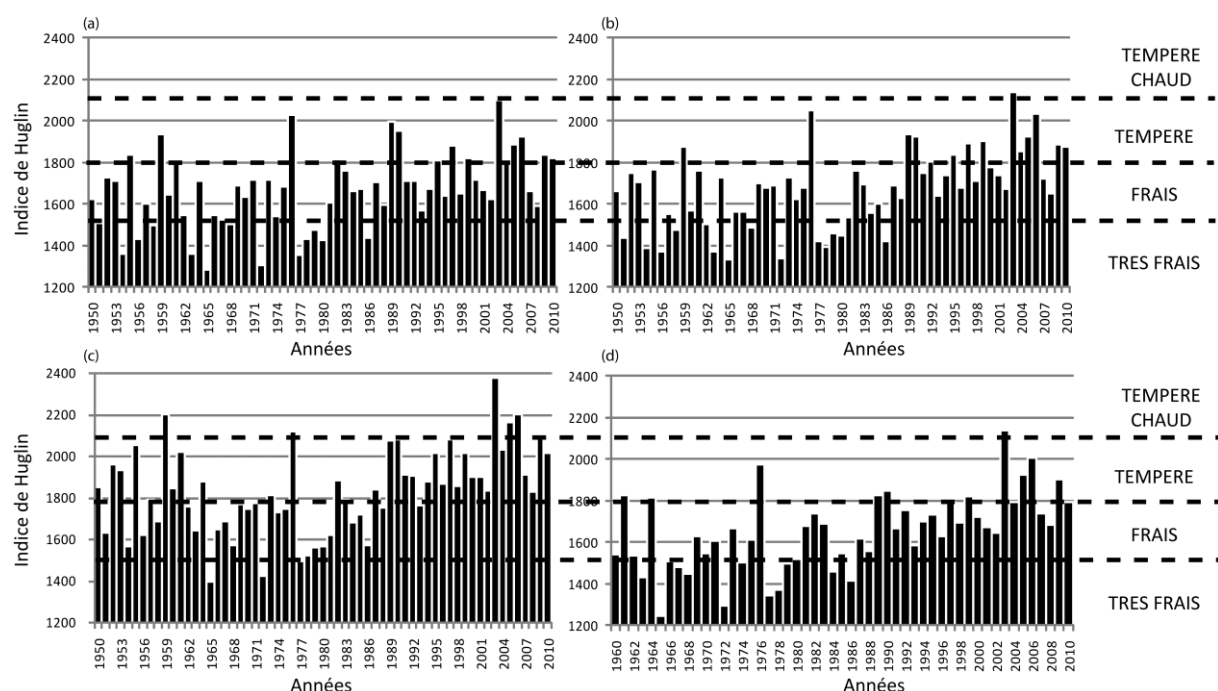


Figure 22 : Evolution de l'indice de Huglin pour 4 stations météorologiques (a : Nantes, b : Angers, c : Saumur, d : Tours) dans le Val de Loire (France) au cours de la période 1950/60 à 2010 (Bonnefoy et al. 2012).

L'indice de Winkler a aussi augmenté de façon significative dans tout le Val de Loire, ce qui a entraîné une précocité des stades phénologiques de la vigne. A Montreuil-Bellay, Barbeau (2007) a mis en évidence une avance des stades phénologiques de floraison, de véraison et de maturité pour quatre cépages rouges. Par ailleurs, la date de la vendange a effectivement avancé depuis 1970 en Val de Loire (Figure 23). Par exemple, pour Cabernet franc, cette avance est de 15 jours en Bourgueil et de 17 jours pour Chenin blanc en Touraine.

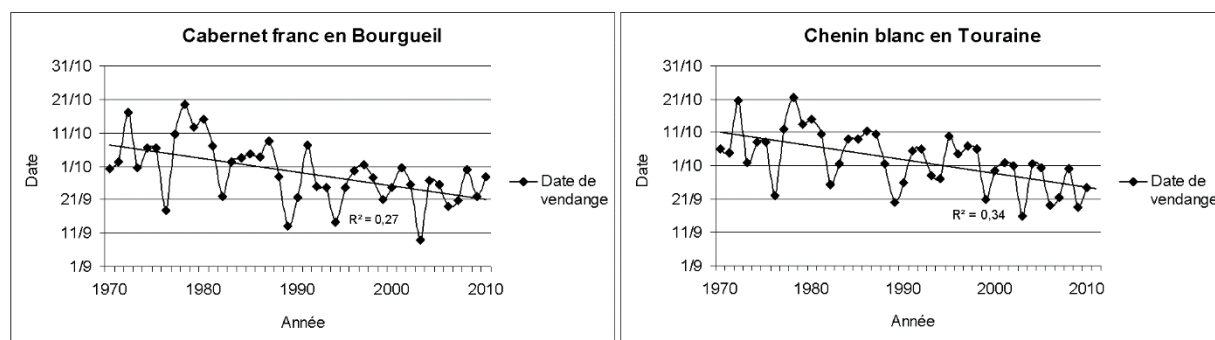


Figure 23 : Evolution de la date de vendange pour Cabernet franc en Bourgueil et pour Chenin blanc en Touraine, de 1970 à 2010 (Données : Laboratoire de Touraine)

En comparant la moyenne de la date de la vendange de 1990 à 2010 des principaux cépages cultivés en Anjou-Saumur avec celle d'une étude réalisée sur la période de 1950 à 1969, les résultats montrent que la date de la vendange a avancé de 12 à 15 jours, selon le cépage (Tableau 1). Comme la date de la vendange est d'environ deux semaines plus précoce, la période de la maturation correspond désormais à une période plus chaude de l'année. Or,

pour les cépages tardifs, tels que le Chenin et le Cabernet franc, les températures plus chaudes favorisent le fonctionnement de la vigne et influencent la composition des baies de manière significative.

Tableau 1 : Evolution des dates de la vendange des principaux cépages cultivés en Anjou et Saumur
(Source données : ATV 49, Ministère de l'Agriculture 1970)

Cépage	Moyenne de la date de vendange (1950-1969)	Moyenne de la date de vendange (1990-2010)
Cabernet franc	15 oct.	30 sept.
Gamay	4 oct.	22 sept.
Grolleau noir	6 oct.	22 sept.
Chenin blanc	11 oct.	28 sept.

Les six principaux cépages blancs et rouges cultivés dans le Val de Loire montrent une évolution significative de la composition des raisins (Tableau 2). Bien que ces cépages soient cultivés dans différents sous-bassins du Val de Loire, une tendance similaire à une diminution de l'acidité totale et à une augmentation de la teneur en sucre est observée. En Anjou, par exemple, pour le Cabernet franc la teneur en sucre est passée de moins de 170 g/L à plus de 200 g/L et, pour le Chenin blanc, de moins de 180 g/L à plus de 210 g/L, depuis 1981. Par conséquent, le degré d'alcool probable est passé de 10° à plus de 12,5° pour le Cabernet franc et d'environ 10,5° à plus de 12° pour le Chenin blanc. Pour ces deux cépages, l'acidité totale a diminué de 2 g/L et, par conséquent, les raisins sont vendangés désormais avec une teneur en acidité totale allant de 4,5 g/L à 6 g/L.

Tableau 2 : Evolution de la composition des raisins pour des principaux cépages blancs et rouges cultivés dans le Val de Loire [Sources données : CA (44) ; ATV (49) ; Laboratoire de Touraine (37) ; SICAVAC (18)].

Région (Numéro département)	Cépage (nombre des parcelles)	Série	Teneur en sucre (g/L)	Degré Alcoolique Probable	Acidité Totale (g/L)
Muscadet (44)	Melon (20)	1986–2009	+24,1 g/L *	+1,4°	-0,7 g/L
Anjou (49)	Sauvignon blanc (2)	1981–2010	+38,9 g/L ***	+2,3°	-1,0 g/L
Anjou (49)	Chenin (8)	1981–2010	+38,2 g/L ***	+2,3°	-2,0 g/L **
Anjou (49)	Gamay (6)	1981–2010	+25,0 g/L **	+1,5°	-1,2 g/L **
Anjou (49)	Grolleau noir (5)	1981–2010	+36,5 g/L ***	+2,2°	-2,0 g/L **
Anjou (49)	Cabernet franc (10)	1981–2010	+46,6 g/L ***	+2,8°	-2,2 g/L **
Saumur (49)	Chenin blanc (2)	1981–2010	+38,0 g/L ***	+2,3°	-3,0 g/L ***
Saumur (49)	Cabernet franc (4)	1981–2010	+54,4 g/L ***	+3,2°	-2,0 g/L ***
Bourgueil (37)	Cabernet franc (5)	1970–2010	+41,0 g/L ***	+2,4°	-2,8 g/L ***
Chinon (37)	Cabernet franc (5)	1970–2010	+51,8 g/L ***	+3,0°	-2,7 g/L ***
Touraine (37)	Sauvignon blanc (3)	1981–2010	+58,3 g/L ***	+3,5°	-2,8 g/L ***
Touraine (37)	Chenin (9)	1979–2010	+39,4 g/L ***	+2,3°	-3,1 g/L ***
Touraine (37)	Gamay (5)	1980–2010	+47,2 g/L ***	+2,8°	-2,4 g/L ***
Touraine (37)	Grolleau noir (4)	1980–2010	+53,5 g/L ***	+3,2°	-3,5 g/L ***
Sancerre (18)	Sauvignon blanc (1)	1980–2009	+45,6 g/L ***	+2,7°	-1,7 g/L **

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ et *** $p < 0.001$ respectivement

CONCLUSION

Depuis le premier rapport du GIEC, les connaissances scientifiques concernant le changement climatique ont beaucoup progressées. Dans la majeure partie du monde, les enregistrements climatiques à long terme ont démontré une hausse des températures moyennes avec un réchauffement plus intense dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord. Cette tendance du réchauffement global a été accompagnée par des modifications des régimes de précipitations et des phénomènes climatiques extrêmes bien que celles-ci restent toutefois moins cohérentes dans le temps et l'espace par rapport à la température. Les impacts des changements climatiques sont déjà perceptibles sur des systèmes naturels et humains comme la viticulture. Bien que l'activité viticole soit fortement influencée par l'homme, l'analyse des données agroclimatiques issues des réseaux de mesures (sur plusieurs décennies) ont permis d'évaluer l'impact de l'évolution climatique sur la viticulture mondiale. Dans la plupart des régions viticoles, la vigne « a répondu » au réchauffement climatique par une avancée des stades phénologiques, par une diminution de l'acidité des raisins et par une augmentation de la teneur en sucre, ce qui se traduit par un degré d'alcool plus important dans les vins.

Attribués aux forçages naturels et anthropiques, le changement climatique actuel « est appelé » à se poursuivre, voir à s'intensifier dans le futur. Dans le chapitre 1, il a été montré que le climat, et en particulier la température, joue un rôle central sur le comportement de la vigne notamment au niveau de la phénologie. La poursuite d'un réchauffement au cours du 21^e siècle devrait ainsi conduire à une avancée significative des stades phénologiques ; comme cela a été observé ces dernières décennies. Cette avancée très plausible de la phénologie de la vigne pose de nombreuses questions : à court terme, il est probable qu'il y ait des conséquences importantes sur la composition des raisins ; celle-ci étant liée avec des températures plus élevées et une période de maturité plus précoce, où les raisins mûrissent avec des conditions plus chaudes. L'évolution future de la qualité de la matière première (i.e. les raisins), signifie inévitablement des modifications au niveau des profils gustatifs et sensoriels des vins. Par conséquent, les effets attendus sur la viticulture à court terme sont des modifications de la qualité et de la typicité des vins, qui peuvent présenter des opportunités ou des risques selon les régions viticoles. Vers la fin du 21^e siècle, une phénologie plus précoce peut remettre en question l'aptitude des cépages actuellement cultivés dans leurs régions respectives. Pour des régions à climat chaud (e.g. Sud d'Europe), des situations de stress hydriques très importantes, peuvent même avoir un impact sur l'activité économique viticole. Dans ce contexte, l'adaptation des pratiques viticoles à différentes échelles spatiales et temporelles devient essentielle pour la viticulture. Cet enjeu d'une adaptation raisonnée au changement climatique est présenté dans le Chapitre 3.

CHAPITRE 3

Vers une adaptation raisonnée au changement climatique

INTRODUCTION

D'après les dernières estimations du GIEC (2013), la température moyenne du globe devrait augmenter de $+1.0^{\circ}\text{C}$ [$+0.3^{\circ}\text{C}$ à 1.7°C] à $+3.7^{\circ}\text{C}$ [$+2.6^{\circ}\text{C}$ à $+4.8^{\circ}\text{C}$], d'ici la fin du 21^e siècle. Aux échelles régionales et locales, ces tendances futures sur l'évolution de la température et des autres paramètres climatiques (e.g. les régimes de précipitations), auront un impact significatif au niveau physique (e.g. les ressources en eau,...), biologique (e.g. la biodiversité terrestre et marine,...) et humain (e.g. la production alimentaire, la santé humaine,...). Pour lutter contre le changement climatique, l'atténuation (ou la mitigation) est l'une des principales réponses politiques au changement climatique (GIEC 2014). Variant selon les pays et les secteurs, l'atténuation concerne un ensemble de mesures humaines (e.g. économiques, technologiques), visant à réduire les sources d'émissions de gaz à effet de serre. En traitant ainsi des causes anthropiques du changement climatique, l'atténuation apporte des bénéfices à l'échelle globale (Füssel 2007). Si des mesures d'atténuation significatives et vigoureuses pouvaient être mises en place rapidement, la hausse de la température moyenne du globe pourrait être stabilisée à environ $+2^{\circ}\text{C}$ par rapport à l'ère préindustrielle (Meehl et al. 2012), voire même, aux alentours de $+1.5^{\circ}\text{C}$, comme cela a été évoqué lors de la 21^e Conférence des parties (COP 21) en 2015.

Toutefois, cela paraît peu probable. En raison des longs délais impliqués dans les processus et les rétroactions du système climatique de la Terre, les effets bénéfiques d'atténuation mettront de nombreuses années à se manifester, quels que soient leur ampleur et leur intensité (Meehl et al. 2012 ; GIEC 2014). De plus, la tendance actuelle des émissions de dioxyde de carbone continue de suivre les scénarios les plus pessimistes du GIEC, ce qui rend un réchauffement inférieur à $+2^{\circ}\text{C}$ peu réaliste (Rogelj et al. 2011 ; Peters et al. 2013). Face à la poursuite du changement climatique et à ses impacts actuels et attendus, l'adaptation est nécessaire et semble être plus plausible que l'atténuation, devenant ainsi la priorité pour tous les secteurs sensibles au climat (Smit and al. 1999 ; Füssel 2007). D'après le GIEC, l'adaptation est « *l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'en atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques* ».

La viticulture, comme toute autre activité agricole, a toujours été confrontée à la notion d'adaptation. En dehors des adaptations individuelles à court terme, l'adaptation au

phylloxéra à la fin du 19^e siècle est un bon exemple d'une adaptation collective à grande échelle, où la majorité des vignobles (e.g. en Europe) ont été affectés (Nicholas and Durham 2012). Aujourd'hui, le changement climatique se positionne également comme un défi à grande échelle, posant de nombreuses questions nouvelles et incertaines, à la fois dans le temps et dans l'espace. En même temps que les adaptations autonomes ou spontanées³¹, le changement climatique nécessite le développement d'adaptations planifiées (Metzger et Rounsevell 2011). En effet, les adaptations autonomes (et en particulier leur efficacité) ont généralement lieu grâce à une planification préalable (e.g. l'irrigation). En raison de la pérennité de la vigne, les vignes plantées au cours de la prochaine décennie, et qui restent économiquement productives pendant de nombreuses années, seront exposées aux changements climatiques. Ainsi, dès à présent, une adaptation planifiée est nécessaire afin de réduire les impacts environnementaux et socio-économiques attendus (e.g. replantation d'une parcelle), ou de saisir des opportunités (e.g. dans des vignobles septentrionaux où le réchauffement a ou aura un impact positif).

Dans le chapitre 1, la dynamique temporelle et la complexité spatiale de la viticulture ont été présentées, celles-ci montrant que l'évaluation de l'adaptation et notamment l'enjeu d'une adaptation planifiée nécessitent plusieurs approches permettant de formuler une réponse raisonnée au changement climatique. Ce chapitre vise ici à présenter ces approches d'évaluation, qui sont basées sur : i) les scénarios climatiques et ii) la connaissance locale.

3.1. Les approches d'évaluation

3.1.1. Basée sur les scénarios climatiques

Cette approche est souvent considérée comme l'approche standard et pour cette raison, son application est très nombreuse dans des régions viticoles (Webb et al. 2007 ; Duchêne et al. 2010 ; Malheiro et al. 2010 ; Hannah et al. 2013 ; Fraga et al. 2015 ; Cabré et al. 2016). Dans un premier temps, elle vise à évaluer les impacts attendus sur la viticulture et à partir des résultats, d'estimer dans un deuxième temps, les mesures d'adaptation nécessaires pour réduire toute vulnérabilité plausible au changement climatique. Ainsi, suivant une approche descendante qui implique toute une série d'étapes successives (Figure 24), ces recherches accordent une grande dépendance à l'égard des projections climatiques régionalisées et des modèles d'impacts (Dessai et Hulme 2004 ; O'Brien et al. 2007). Ces modèles sont des représentations simples du comportement de la vigne (e.g. indices agronomiques tels que l'Indice de Huglin, de Winkler,...) ou des modélisations plus complexes, intégrant plusieurs variables (e.g. modèle STICS-Vigne,...).

31 D'après le GIEC, l'adaptation autonome n'est pas une réponse consciente aux stimuli climatiques, mais qui résulte de changements écologiques dans les systèmes naturels ou d'une évolution des conditions du marché ou de l'état de bien-être dans les systèmes humains. L'adaptation planifiée est une adaptation résultant d'une décision stratégique délibérée, basée sur une perception claire du fait que les conditions ont changé ou sont sur le point de changer.

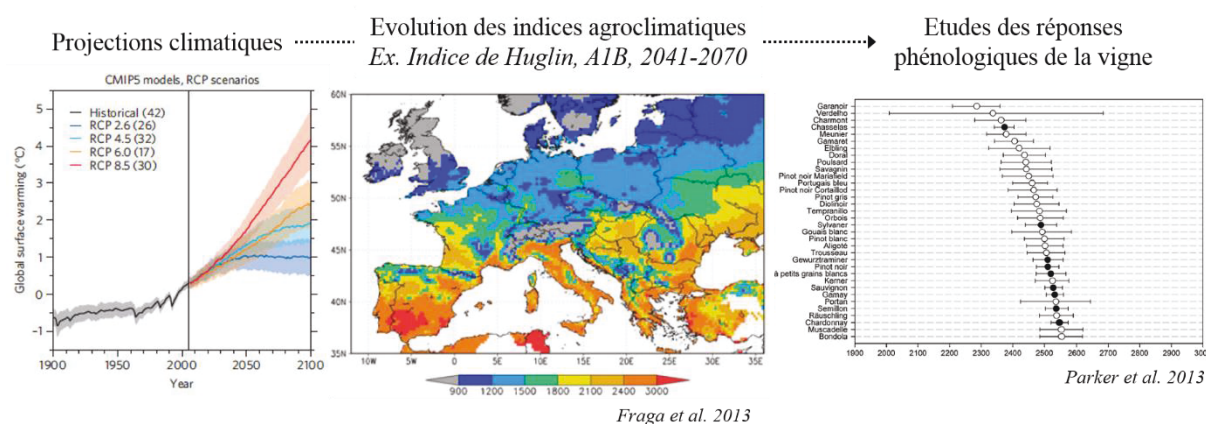


Figure 24 : Série d'étapes successives lors d'une évaluation des impacts du changement climatique sur la viticulture.

Le calcul de ces modèles d'impacts en fonction des différents scénarios du GIEC, que ce soient les anciens (SRES) ou les nouveaux (RCP), font apparaître d'importantes modifications viticoles au cours du 21^e siècle. Parmi les variables climatiques, la température est la plus sollicitée, d'une part car elle représente la variable la plus « sûre » dans le temps, et d'autre part en raison de son rôle central sur le comportement de la vigne (i.e. réponse phénologique, ...). Les résultats sur la base des projections montrent que :

- Les stades phénologiques de la vigne (i.e. débourrement, floraison, véraison, maturité) vont subir des avancées significatives (Webb et al. 2007 ; Duchêne et al. 2010 ; Pieri 2010 ; Fraga et al. 2016). En raison d'une avancée des dates de vendanges, et une période de maturité plus chaude (Duchêne et al. 2010), la composition des raisins devrait évoluer de manière très importante (e.g. augmentation de la teneur en sucre, baisse de l'acidité,...).
- La biomasse de la vigne est projetée à augmenter grâce à un fonctionnement photosynthétique plus important (i.e. en réponse à une augmentation de la teneur en CO₂ et la température de l'air). Toutefois, cette modification est plus incertaine en raison du rôle de l'alimentation hydrique et son évolution future, ainsi que la disponibilité en azote.
- La géographie actuelle des cépages cultivés et des régions productrices de vin devrait évoluer de manière importante. En Europe, Moriondo et al. (2013) ont calculé différents indices agroclimatiques avec les sorties du modèle HadCM3 en fonction des scénarios d'émissions A2 et B2 (i.e. anciens SRES). Les résultats se traduisent par une augmentation des indices engendrant une modification de la structure climatique des zones cultivées en vignes. La même tendance est observée aussi bien dans les vignobles du sud que ceux du nord, mais l'intensité du changement climatique est plus forte dans les régions viticoles du sud. Ces résultats en Europe ont été confirmés par les travaux de Fraga et al. (2013) et Santos et al. (2012). Dans ce contexte, le travail de Hannah et al. (2013) a notamment montré des résultats inquiétants pour la viticulture, particulièrement pour les régions viticoles traditionnelles (Figure 25). Les simulations montrent que dans les régions du bassin méditerranéen, la poursuite du réchauffement pourrait entraîner une diminution progressive de la viticulture.

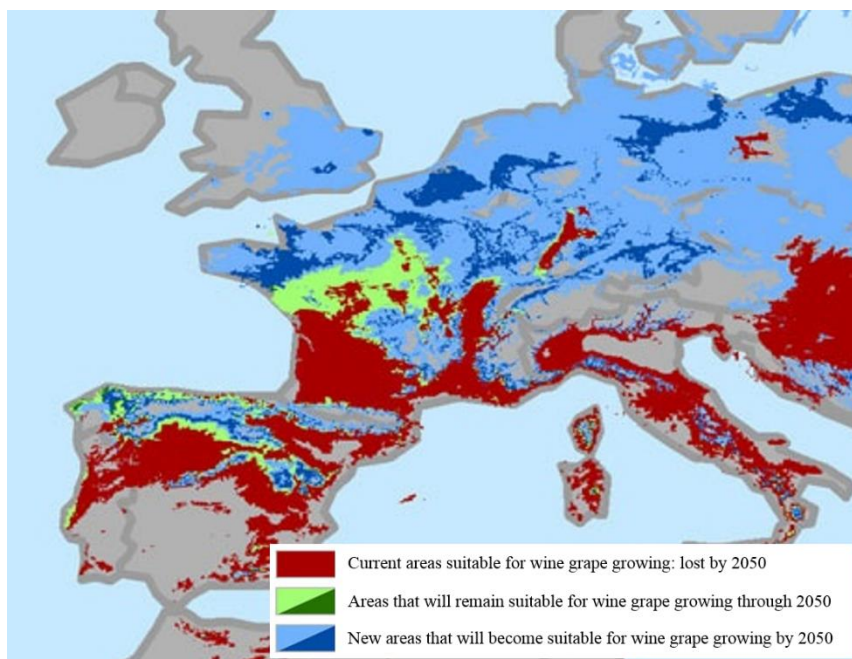


Figure 25 : A l'échelle de l'Europe, le changement attendu à l'horizon 2050 dans l'aptitude des régions pour la culture de la vigne selon le scénario RCP 4.5 (Hannah et al. 2013).

En réponse aux conséquences liées à la poursuite du changement climatique, de nombreuses études ont permis d'identifier des pratiques d'adaptation (Schultz et Stoll 2010 ; Mozell et Thach 2014 ; Quénol 2014 ; Van Leeuwen et Darriet 2016). Considérant les impacts à court terme, l'adaptation des pratiques culturales telles que la gestion du sol et de la vigueur peuvent présenter les réponses clés. En réponse au réchauffement, un des défis les plus importants sera de retarder le cycle reproductif qui devrait avancer significativement. Comme mentionné dans le Chapitre 1, une maturité atteinte trop tôt conduira à des raisins riches en sucres, peu acides, qui manqueront de potentiel aromatique et donneront des vins déséquilibrés. Dans ce contexte, il n'existe peut-être pas une seule option, mais un ensemble d'ajustement qui devrait permettre de faire face aux effets du changement climatique.

A long terme, en réponse à l'augmentation de la température et la fréquence d'épisodes secs, le choix d'un cépage plus tardif ou un porte-greffe plus résistant à la sécheresse deviendra sûrement nécessaire. L'irrigation est aussi une solution pour répondre aux besoins hydriques de la vigne, ou encore les modes de conduite, qui permettent notamment d'agir sur le microclimat de la vigne. Enfin, bien que l'adaptation soit déjà en cours dans les pratiques œnologiques, celles-ci offrent aussi toute une gamme de possibilités pour répondre, par exemple, à un niveau d'acidité très bas ou un degré d'alcool très élevé. Le Tableau 3 synthétise les adaptations plausibles en réponse à une augmentation des températures et à une sécheresse accrue (Van Leeuwen et Darriet 2016). Elle concerne les mesures qui peuvent être réalisés à l'échelle d'une parcelle donnée et ne comprennent pas le déplacement de la parcelle.

Toutefois, les différents travaux basés sur les calculs de différents modèles d'impacts et scénarios du changement climatique ne permettent de faire que des estimations sur la viticulture future et non pas d'en tirer des certitudes. Ils indiquent un large éventail d'adaptations possibles plutôt que réels (Smit and Wandel 2006 ; Crane et al. 2011). En

dehors des incertitudes issues des modèles d'impact et des scénarios utilisés, ainsi que de la résolution des simulations, la plupart de ces études se basent uniquement sur des facteurs physiques et biologiques, et de ce fait limitent la dimension humaine de la viticulture et en particulier sa nature dynamique.

Tableau 3 : Exemples des types de réponses plausibles à la poursuite du changement climatique pour une parcelle donnée (adaptées de Van Leeuwen et al. 2016).

Mesure d'adaptation	Augmentation de la température ^a	Mesure d'adaptation	Sécheresse accrue ^b
Taille tardive	3-5 jours	Espèces d'enherbement moins concurrentielles	Faible
Augmentation de la hauteur du tronc	3-5 jours	Travail superficiel du sol	Faible
Dégradation du rapport feuille-fruit	5-12 jours	Techniques de paillage	Faible
Sélection d'un porte-greffe qui rallonge le cycle végétatif	3-6 jours	Système de palissage (e.g. vignes en gobelet)	Moyen
Sélection clonale	3-8 jours	Sélection du matériel végétal (e.g. porte-greffe)	Moyen
Choisir un autre cépage local, plus tardif	0-14 jours	Irrigation	Forte
Choisir un cépage plus tardif	10-25 jours		

^aEffet sur le retard du cycle reproducteur de la vigne

^bSelon l'intensité de la sécheresse

Par exemple, en réponse à l'article de Hannah et al. (2013), Van Leeuwen et al. (2013) ont indiqué qu'il fallait prendre beaucoup de précautions pour tirer des certitudes de ce type d'analyse (Figure 26). Pour illustrer cela, Van Leeuwen et al. (2013) ont proposé une comparaison de la température durant la saison végétative de la vigne (AvGST) 1971 à 1999 et de 2000 à 2012 pour trois grandes régions viticoles : Rheingau (Allemagne), Bourgogne (France), et la vallée du Rhône (France). La Bourgogne continue toujours de produire de grands vins de Pinot noir depuis 2000, malgré que la valeur de l'AvGST soit déjà au-dessus de la limite supérieure des températures citées par Hannah et al. (2013). Les résultats sont similaires pour le Rheingau avec le Pinot gris et la vallée du Rhône avec la Syrah.

D'une part, il est très difficile d'établir des limites d'aptitudes précises par cépage pour la production des vins de grande qualité (i.e. sa limite minimale est plus facile à discerner que sa maximale), et d'autre part, il est nécessaire de tenir compte des pratiques de gestion des viticulteurs. Ainsi, afin de mieux raisonner l'adaptation, son évaluation doit intégrer des aspects physiques, biologiques mais aussi techniques et socio-économiques, à différentes échelles.

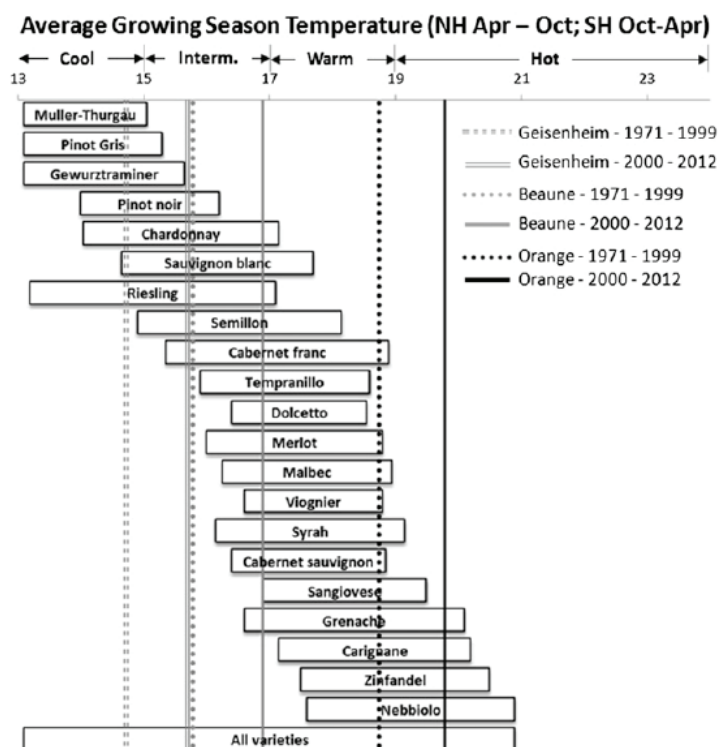


Figure 26 : Température moyenne durant la période de croissance de la vigne de 1971 à 1999 et de 2000 à 2012 à Rheingau, Allemagne ; en Bourgogne, France et dans la Vallée du Rhône, France (Van Leeuwen et al. 2013).

3.1.2. Basée sur la connaissance locale

L'évaluation basée sur la connaissance locale a émergé comme un outil clé pour informer l'adaptation au changement climatique (Kelly et Adger 2000; Brooks 2003; Ford et Smit 2004; Smit et Wandel 2006). En effet, elle représente plus explicitement les facteurs et les processus locaux (e.g. physiques, techniques, socio-économiques) qui définissent la vulnérabilité locale (Ford et Smit 2004 ; Crane et al 2011). Ceci est particulièrement approprié dans le secteur viticole puisque la qualité des raisins et des vins produits est fortement liée aux caractéristiques de leur situation géographique (White et al. 2009 ; Metzger et Rounsevell 2011), où les prises de décision des viticulteurs sont importantes (Van Leeuwen et Seguin 2006). En effet, le manque de compréhension de ces processus et facteurs locaux (Ford et Smit 2004 ; Crane et al. 2011), peut conduire à une évaluation erronée de l'impact potentiel du changement climatique et notamment, des stratégies d'adaptation nécessaires à différentes échelles temporelles et spatiales (Holland et Smit 2010 ; Quénot 2014).

3.1.2.1. La connaissance du milieu local

Dans le Chapitre 1, il est indiqué que « *chaque région viticole est constituée de divers climats locaux* ». Cette diversité climatique est issue d'une forte diversité de conditions topographiques et pédologiques, qui se traduit sur le comportement de la vigne.

Fort de ce constat, une méthode de caractérisation des facteurs naturels du terroir a été développée et mise en œuvre par l'Unité Vigne et Vin de l'INRA d'Angers au cours des années 1990 en moyenne vallée de la Loire (Morlat 2001 ; Morlat 2010). Leur hypothèse de

départ était qu'une région ou appellation viticole comporte plusieurs unités physiques de terroirs (Barbeau 2008). Ces unités correspondent à une « *unité spatiale de fonctionnement homogène de la vigne, valorisable par la viticulture* » (Morlat 2001), et ont été définies à partir de trois composantes du milieu naturel : la géologie, l'agropédologie et le paysage. La composante géologique se réfère à l'étage et à la nature de la roche-mère. L'agropédologie décrit la chaîne de sols qui y est associée. La composante paysagère fournit des informations supplémentaires quant au type de relief, la fourchette d'altitude ou la présence de masques (e.g. zones boisées,...) pouvant interférer avec la circulation des vents ou l'ensoleillement. Les unités de terroirs ont été déterminées et spatialisées à l'échelle du 1/10 000, qui ont été dans un premier temps mis à la disposition des viticulteurs sous forme d'Atlas cartographiques dans les mairies communales, mais qui sont disponibles aujourd'hui sous forme informatique. En dehors des facteurs physiques du sol (e.g. texture, profondeur,...), les variables de fonctionnement de la vigne ont été également estimées grâce à des algorithmes experts (Figure 27). A cet effet, des cartes conseils pour le choix des cépages, des porte-greffes et des techniques culturales, les mieux adaptés à chaque unité de terroir, ont été proposées. L'intérêt de la méthode est que les cartes sont utilisables à l'échelle de la parcelle.

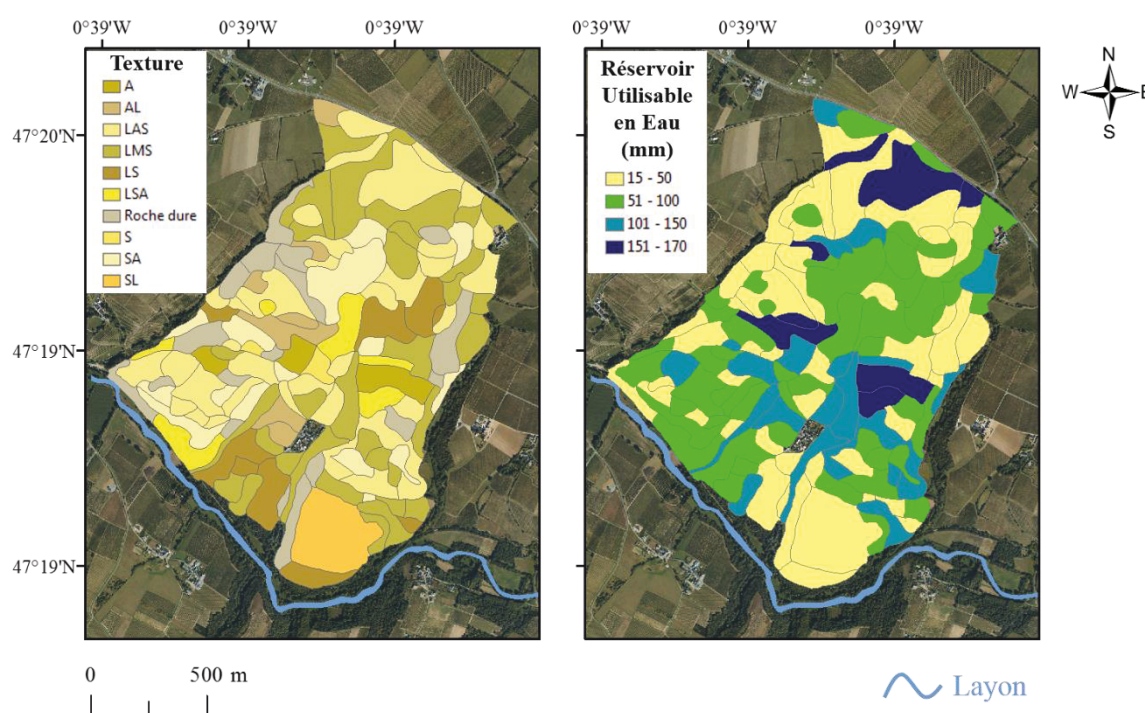


Figure 27 : Exemple d'atlas cartographique réalisé à l'échelle d'une appellation en Val de Loire, l'AOP Coteaux du Layon Premier Cru Chaume. La première carte représente la texture du sol en profondeur et la deuxième, le réservoir utilisable maximal en eau (RUM mm).

Depuis plusieurs années, des analyses agroclimatiques à l'échelle des vignobles ont été réalisées dans le cadre des projets ANR-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM. Ces projets ont suivi une démarche d'échelles spatiales imbriquées, en étudiant les effets locaux (e.g. altitude, inclinaison ou orientation de la pente, distance à la rivière, etc.) sur des variations climatiques à l'échelle des vignobles. Afin d'améliorer la connaissance du climat à l'échelle locale, des instruments de mesures climatiques ont été installés dans des conditions

topographiques différentes de plusieurs régions viticoles du monde entier (e.g. France, Afrique du Sud, Argentine, Nouvelle Zélande, Uruguay,...). Les résultats montrent que la variabilité locale du climat peut être supérieure à la variabilité climatique d'échelles plus vastes (Quénol 2014). La figure 28 illustre la forte variabilité spatiale des sommes de températures (i.e. degré-jours) calculées durant le cycle végétatif de la vigne en Bourgogne, ainsi que la variabilité des températures minimales lors d'un refroidissement nocturne dans les vignobles du Cap, Afrique du Sud. Très souvent cette variabilité spatio-temporelle du climat liée à des phénomènes d'échelles imbriquées (i.e. du macroclimat au microclimat) fournit les conditions optimales pour le comportement de la vigne et caractérise à terme la spécificité d'un terroir viticole (Carey et al. 2008 ; Bonnefoy et al. 2012). La prise en compte de ces effets locaux est donc indispensable pour la mise en place de méthodes d'adaptation raisonnée au changement climatique. D'autre part, la connaissance de cette variabilité climatique devrait permettre d'identifier les leviers d'adaptation qui existent aux échelles locales.

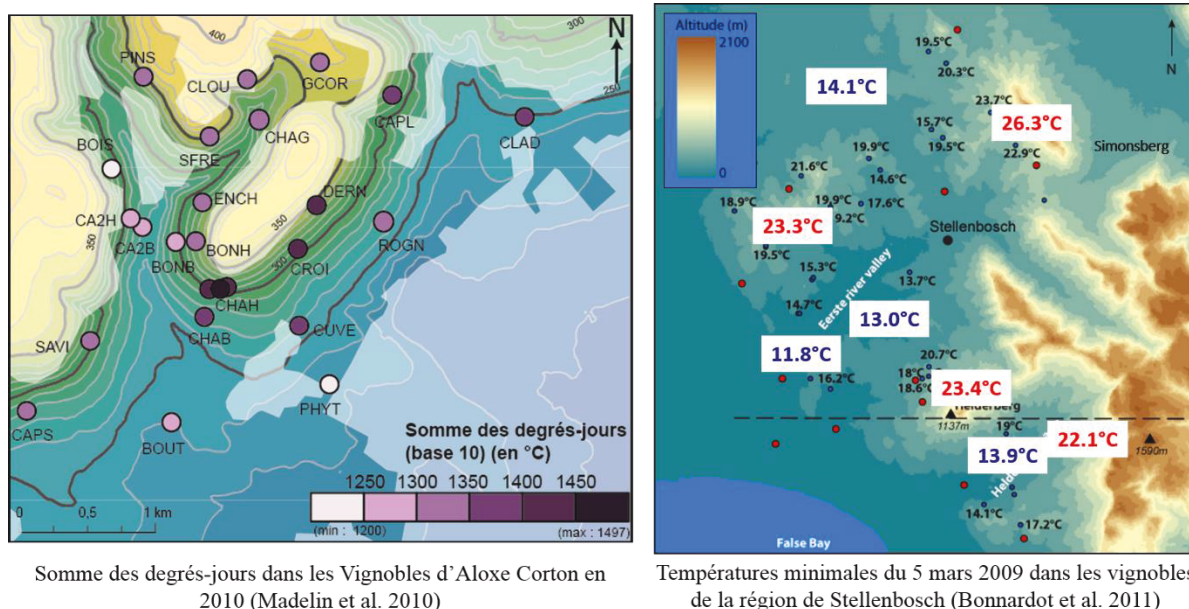


Figure 28 : Forte variabilité spatiale des conditions climatiques observée à l'échelle des vignobles. A gauche est l'exemple des variations des sommes des degrés-jours durant le cycle végétatif de la vigne (Madelin et al. 2010) et à droite, la variabilité des températures minimales le 5 mars 2009, lors d'un refroidissement nocturne dans les vignobles du Cap, Afrique du Sud (Bonnardot et al. 2011)

Dans le contexte du changement climatique, où les incertitudes sur l'évolution future du climat sont nombreuses, la connaissance du milieu local (i.e. conditions édaphiques et climatiques) permet de mieux évaluer dès à présent des pratiques annuelles et pérennes à l'échelle parcellaire. En effet, une adaptation aux sensibilités climatiques actuelles devrait améliorer la résilience future de la vigne, face à un climat changeant. A l'aide d'une connaissance accrue du milieu local et des potentialités agroclimatiques, le savoir-faire du viticulteur peut évoluer vers un meilleur raisonnement des modes de conduite (e.g. la gestion de la vigueur, du sol,...) à court terme et le choix du matériel végétal (i.e. porte-greffe et cépage) à moyen et à long terme. La modélisation de l'évolution du bilan hydrique dans les vignobles de l'AOP Coteaux du Layon Premier Cru Chaume est ici un bon exemple d'outil

d'aide à la décision (Figure 29). Ces résultats issus des études climatiques et édaphiques devraient pouvoir sensibiliser le viticulteur sur les itinéraires techniques les plus appropriés en fonction de la nature du sol et le type de vin qu'il souhaite produire. Ces études montrent la forte variabilité présente d'une parcelle à une autre et en quoi l'adaptation d'un porte-greffe adapté au type de sol est importante. Cela est d'autant plus important que, dans l'appellation « Chaume », 75% des porte-greffes en place ne sont pas adaptés aux conditions de milieu (Goulet et Morlat 2010).

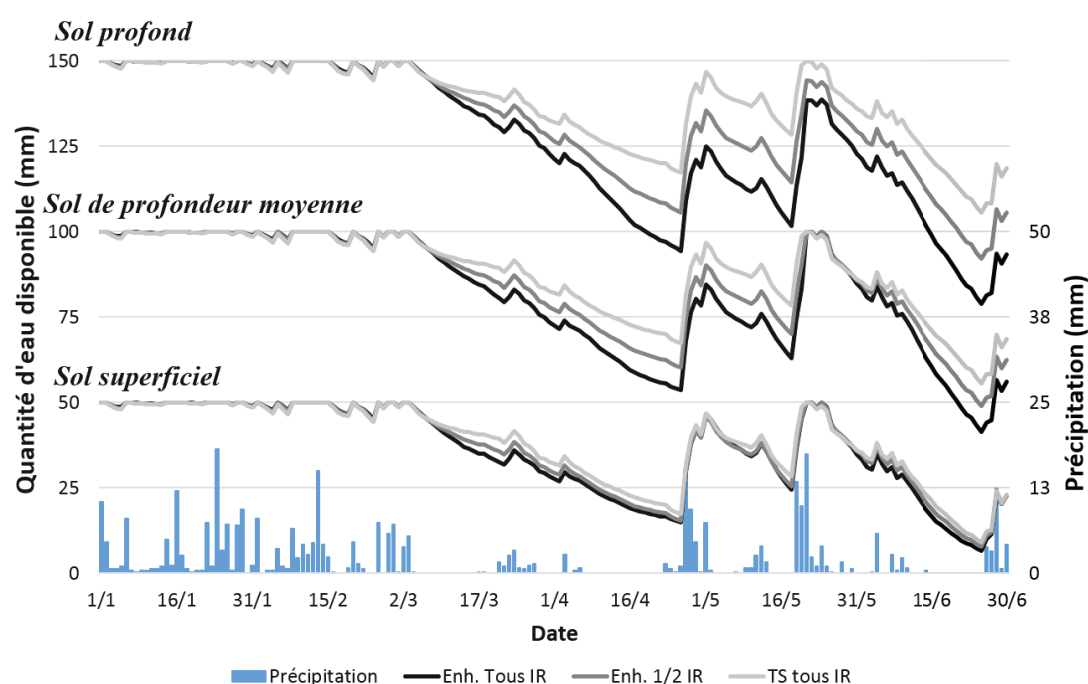


Figure 29 : Modélisation de l'évolution du bilan hydrique dans les vignobles de l'AOP Coteaux du Layon Premier Cru Chaume du 1 avril au 30 juin 2014, selon trois parcelles dont la nature du sol (i.e. sol superficiel, profondeur moyenne, profond) et les pratiques viticoles dans les inter-rangs sont différentes (i.e. Enh. Tous IR = Enherbement dans tous les inter-rangs, Enh. 1/2 IR = Enherbement un rang sur deux, TS tous IR = Travail du sol dans tous les inter-rangs).

3.1.2.2. La connaissance du comportement des viticulteurs

Toutefois, évaluer si le changement climatique pose un défi, ou non, dépend fortement de la capacité des acteurs locaux à s'adapter aux nouvelles conditions (Belliveau et al. 2006 ; Hadarits et al. 2010 ; Webb et al. 2010 ; Nicholas and Durham 2012 ; Holland and Smit 2013 ; Lereboullet et al. 2013). En effet, ces études locales, conduites auprès des viticulteurs soulignent l'importance de comprendre que la vulnérabilité est très variable, étant spécifique au système et lieu (i.e. au contexte), au temps (i.e. elle est dynamique) et aux stimuli climatiques (Smit and Wandel 2006). En dehors des nombreux facteurs contextuels qui définissent la vulnérabilité locale et qui doivent être pris en compte pour évaluer les types d'adaptations qu'ils emploient (Holland et al. 2010), leur perception concernant le changement climatique est également un facteur important. Une évaluation de la perception du changement climatique par les producteurs de vins dans trois pays européens a montré que la plupart d'entre eux en perçoivent certains éléments : les impacts sur le rendement, la qualité

et les risques de ravageurs et de maladies ont été relevés avec de légères variations selon les pays. Des stratégies d'adaptations varient entre les pays et la volonté d'adopter de nouvelles pratiques (Battaglini et al. 2009). En effet, si d'une part ils ne perçoivent pas le changement climatique comme une actualité et, d'autre part, non comme un risque environnemental, les adaptations planifiées aux changements climatiques ne seront pas réalisées. Le risque est que confrontés à une forte variabilité naturelle du climat, ils ne perçoivent pas l'évolution graduelle du changement climatique. Cette conceptualisation de l'adaptation est également influencée par les cadres réglementaires des appellations.

CONCLUSION

Afin de faire face aux effets du changement climatique, les viticulteurs doivent repenser leurs pratiques et leurs stratégies agronomiques. Bien que l'adaptation ait toujours été un trait caractéristique de la viticulture, celle au changement climatique reste un concept relativement nouveau et incertain, qui se compose de plusieurs défis. Afin de tenir compte de la dynamique temporelle et de la complexité spatiale de la viticulture, une seule approche d'évaluation n'est pas suffisante, il est nécessaire d'appliquer une approche intégrée. En effet, en se basant sur les projections climatiques, il est possible de mieux comprendre et d'anticiper les impacts attendus du changement climatique. Or, ces approches incluent des incertitudes temporelles (e.g. tendance future du climat, modèle d'impact utilisé,...) mais aussi des limites dans leurs résultats à l'échelle spatiale où l'adaptation doit s'appliquer, c'est-à-dire, la parcelle viticole. Par conséquent, les évaluations basées sur la connaissance locale ont ainsi émergé comme des outils clés pour informer l'adaptation au changement climatique. Dans ce chapitre, deux d'entre elles (i.e. connaissance du milieu local et du comportement des viticulteurs) ont été décrites et semblent pertinentes afin de répondre à un enjeu : formuler une adaptation raisonnée au changement climatique.

Bien que n'ayant pas développé l'approche basée sur les analogues climatiques, cette dernière reste complémentaire et pertinente. A titre d'exemple, il convient de citer le cépage Chenin, cultivé en Anjou-Saumur et en Afrique du Sud dans la région du Cap. La comparaison entre ces deux régions permet de mieux comprendre les impacts attendus en Anjou-Saumur en s'appuyant sur le climat actuel du Cap et leurs pratiques viticoles. De même, l'année 2003 par exemple, qui était une année particulièrement chaude en Europe, peut servir comme une analogie des conditions thermiques à venir.

Dans les prochains chapitres, ces approches présentées vont être appliquées afin d'analyser i) les effets du changement climatique attendus dans la sous-région viticole d'Anjou-Saumur, ii) la variabilité spatiale du climat et du comportement de la vigne à échelle fine dans les vignobles, et iii) la vulnérabilité locale et la capacité d'adaptation des viticulteurs. Le tout, afin de répondre à la question d'une adaptation raisonnée au changement climatique.

DEUXIÈME PARTIE

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ANJOU-SAUMUR AU COURS DU 21^e SIÈCLE

La deuxième partie a un double objectif, d'une part de discerner la tendance future du climat en Anjou-Saumur, une sous-région viticole du Val de Loire, et d'autre part, de comprendre quels impacts le changement climatique est susceptible d'avoir au cours du 21^e siècle sur la viticulture. Pour répondre à ces deux objectifs, un seul chapitre est consacré à cette analyse en fonction des trois scénarios climatiques du 5^e rapport d'évaluation du GIEC. Tout d'abord, le chapitre exposera le cadre méthodologique de l'étude et ensuite, les résultats seront présentés en trois temps : projections des températures et des précipitations annuelles et saisonnières, tendance future des indices bioclimatiques, réponse phénologique de la vigne à la poursuite du réchauffement. Pour conclure, le chapitre discutera des impacts attendus sur la viticulture, les incertitudes associées et la question d'adaptation. Cette deuxième partie commence dans un premier temps par la présentation du site d'étude, l'Anjou-Saumur.

SOMMAIRE

	<i>Page</i>
Chapitre 4 Les changements climatiques projetés et les effets attendus dans la sous-région viticole d'Anjou-Saumur	69

ANJOU-SAUMUR

L'Anjou-Saumur est l'une des cinq sous-régions viticoles du Val de Loire, ce dernier qui s'étend du centre de la France à l'océan Atlantique, en suivant le cours de la Loire. Situé à la latitude 47° nord (Figure 32), le vignoble d'Anjou-Saumur est essentiellement implanté dans le département de Maine-et-Loire (49), et en partie dans les départements des Deux-Sèvres et de la Vienne. En Val de Loire, Anjou-Saumur est la plus grande sous-région avec une surface viticole de 19 700 ha et une production annuelle d'environ 135 millions de bouteilles. Elle représente 37% de la superficie totale du Val de Loire et 31% de sa production totale en valeur (InterLoire 2010). Le vignoble d'Anjou-Saumur bénéficie d'une grande diversité. Il se trouve à la rencontre entre deux entités géologiques : à l'ouest, le Massif armoricain et à l'est, le Bassin parisien. A ces deux entités se superpose une troisième, la vallée de la Loire qui traverse le vignoble d'Anjou-Saumur d'est en ouest (Figure 30). Ce contexte géomorphologique donne lieu à une diversité de formes de paysages et de types de sols. Par conséquent, en raison de la mosaïque de reliefs et d'orientations, de la présence de la Loire et de ses affluents, des situations pédologiques très contrastées et d'un grand nombre de cépages blancs et rouges, les viticulteurs produisent des vins de haute qualité, blancs, rouges ou rosés, qui peuvent être secs, demi-secs, liquoreux ou effervescents. Pour cette raison, 30 appellations d'origine protégée (AOP) sont reconnues au sein de cette sous-région, où Chenin et Cabernet Franc sont respectivement les principaux cépages blancs et rouges cultivés. Les conditions réglementaires de production, telles qu'elles sont définies par chaque appellation, jouent un rôle important en Anjou-Saumur, où 90% de la surface totale des vignobles est valorisée au sein d'une de ses 30 AOP (InterLoire 2010).



Figure 30 : Paysage du vignoble d'Anjou-Saumur (exemple : Savennières), longés par la Loire.

➤ Contexte climatique

L'Anjou-Saumur bénéficie d'un climat océanique à tendance septentrionale, avec des hivers peu rigoureux, des faibles amplitudes thermiques annuelles et un régime de précipitation régulier tout au long de l'année (Quénol et al. 2008 ; Joly et al. 2010 ; Bonnefoy 2013). Elle se retrouve ainsi dans la zone de transition climatique du climat « océanique franc » du Pays Nantais, aux caractères plus continentaux de l'Orléanais ou du Sancerrois (Bonnefoy 2013). Par rapport à l'échelle du Val de Loire, l'Anjou-Saumur a un climat plus chaud et particulièrement plus sec (550 mm à 650 mm) (Dubreuil 1994, 1996 ; Bonnefoy 2013). Ces conditions climatiques résultent de l'influence de la Loire et de ses affluents (e.g. le Layon, l'Aubance,...) ainsi que de la présence des reliefs plus élevés des Mauges, situées au sud-ouest de cette sous-région et qui protègent les vignobles des régimes perturbés venant de l'ouest. Les diagrammes ombrothermiques d'Angers et de Montreuil-Bellay, deux stations du réseau régional de Météo France, sont illustrés dans la Figure 31. L'exemple de Montreuil-Bellay, la station installée dans le vignoble, reflète la particularité du régime pluvio-thermique moyen d'Anjou-Saumur, à la limite de la sécheresse estivale (Quénol et al. 2008).

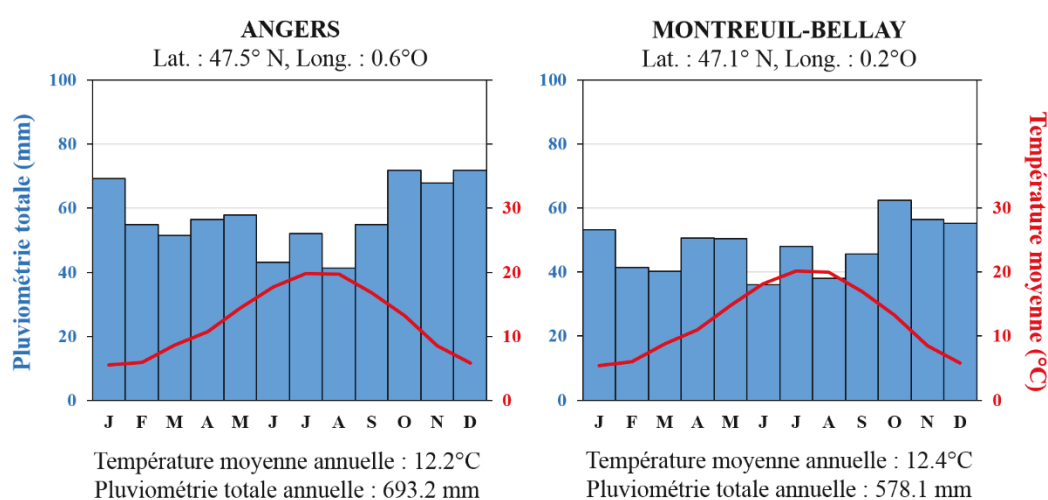


Figure 31: Diagrammes ombrothermiques d'Angers et de Montreuil-Bellay, calculés pour la période de 1981 à 2010 (Données : Météo France).

Depuis le milieu de 20^e siècle, une évolution significative des températures a été observée en Anjou-Saumur (Barbeau 2007 ; Bonnefoy et al. 2012 ; Neethling et al. 2012). A Angers, la température moyenne annuelle et celle de la saison de croissance³² ont augmenté de 1.5°C ($R^2 = 0.39$) et de 1.7°C ($R^2 = 0.39$) respectivement de 1950 à 2010. Cette hausse des températures signifie que la température moyenne de la saison de croissance est passée de 15.1°C (1951-1980) à 16.1°C (1981-2010), évoluant ainsi d'un climat « frais » vers un climat « tempéré » selon l'indice de Huglin. Bien que les précipitations totales annuelles et saisonnières aient fortement varié dans le temps, aucun changement significatif à long

³² Période du 1 avril au 31 octobre.

terme n'a été documenté. En Anjou-Saumur, le comportement de la vigne a été influencé par ces changements climatiques, ce qui s'est traduit par une avancée des dates des principaux stades phénologiques, accompagnée d'une évolution significative de la composition des raisins (Neethling et al. 2012). Cette tendance s'applique à l'ensemble des principaux cépages blancs et rouges qui y sont cultivés³³.

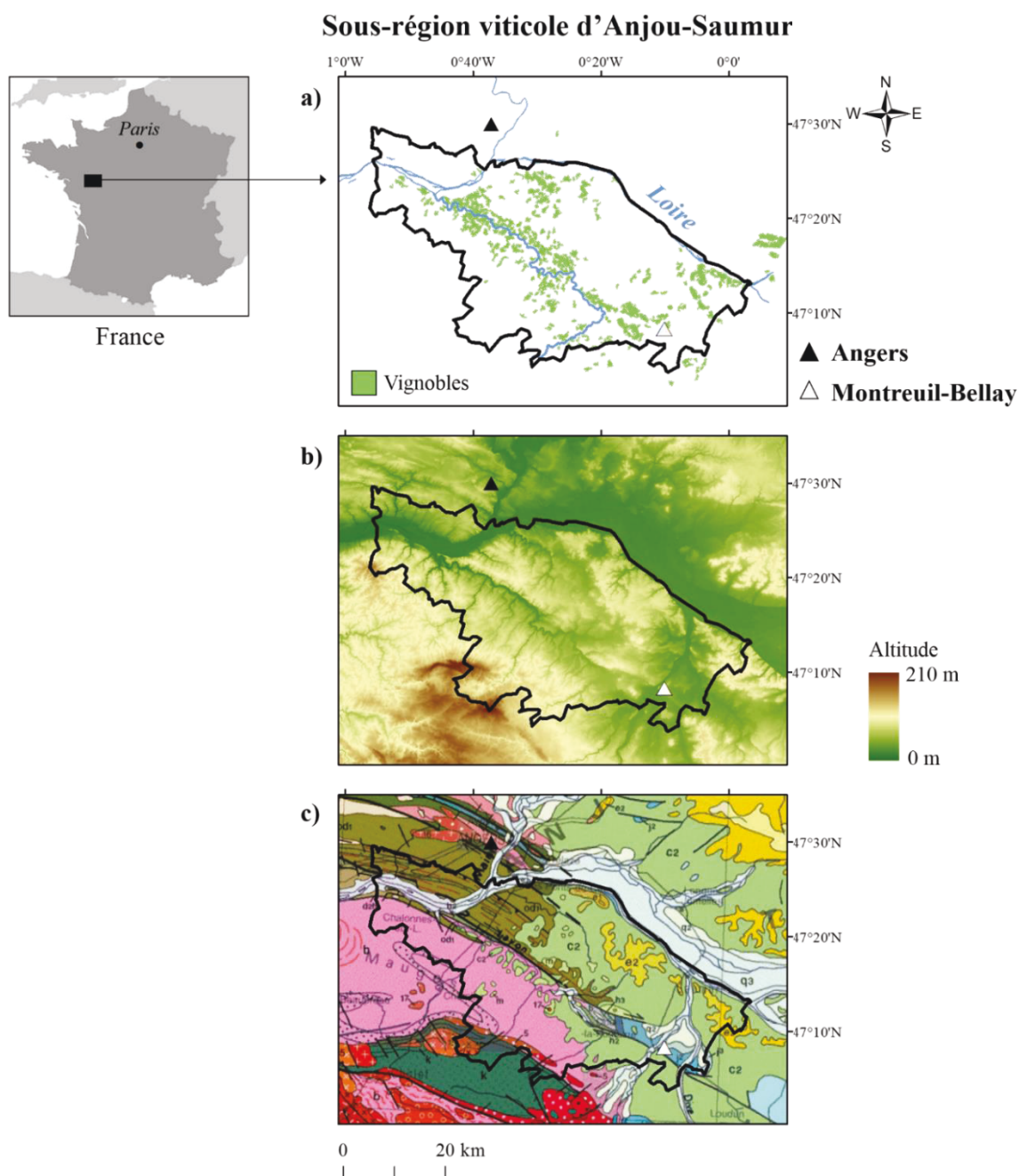


Figure 32 : Pour la sous-région viticole d'Anjou-Saumur : a) Occupation des vignobles, b) Carte du relief, et c) Carte géologique avec le rencontre entre le Massif Armoricain (situé à l'ouest) et le Bassin Parisien (situé à l'est).

³³ Le chapitre 2 présente plus d'information sur le changement climatique en Anjou-Saumur.

CHAPITRE 4

Projected climate changes and potential impacts in the Anjou-Saumur wine growing sub-region

Abstract

Over the next century, the projected increases in regional temperatures and shifts in rainfall patterns and extreme weather events are expected to have important consequences on viticulture. They vary from short-term impacts on wine quality and style, to long-term issues such as varietal suitability and the economic sustainability of traditional wine growing regions. In order to preserve the quality and uniqueness of wines produced from different designation of origins, a better understanding of future climate changes is essential in framing adaptation strategies and policies. In this context, this study assessed the potential impacts of climate change on viticulture in the Anjou-Saumur wine growing sub-region. Climate data from the outputs of a regional model were acquired for three emission trajectories. These simulated datasets were then used to study the trends in climate conditions, viticultural indices and grapevine phenology responses over the 21st century. Results have shown that Anjou-Saumur is projected to continue warming. Annual average temperatures are likely to increase by +0.8°C to +1.1°C in the near future and by +1.1°C to +3.8°C in the far future. Long term trends in rainfall totals were more complex, with no significant change in annual and seasonal patterns. With the predicted warming, important changes in temperature-based viticultural indices were shown. Results demonstrated that the viticultural climate class of Anjou-Saumur is predicted to change significantly. According to the Huglin Index, Anjou-Saumur is likely to shift from a cool climate, suitable for early ripening varieties, to a temperate climate, suitable for medium ripening varieties. All the studied grapevine varieties indicated earlier occurrences in phenological stages in response to the increase in heat accumulation, which were also accompanied by a shortening of phenological intervals. The study was concluded by discussing the expected climate change impacts on viticulture in Anjou-Saumur.

4.1. Study methodology

In order to carry out the assessment of projected climate changes and their potential impacts, a methodological framework consisting of five consecutive steps was developed (Figure 33). The first two steps involved: acquiring high resolution gridded daily datasets for past and future climate scenarios; and using observed climate records to evaluate aspects of model performance. The following three steps dealt with the study of simulated data, with each analysis providing specific insights: i) Changes in annual and seasonal average temperatures and rainfall totals serve as primary indicators of climate changes; ii) trends in viticultural indices help to establish a relationship between expected climate changes and viticultural potential (e.g. in terms of varietal suitability, potential wine style,...); and iii) shifts in the timing and duration of phenological stages gives understanding to how warming trends may affect grapevine phenology, and how changing climate conditions during growth intervals are likely to affect grape production. The findings from these three assessments should provide a context for the discussion of the potential impacts of a changing climate in Anjou-Saumur.

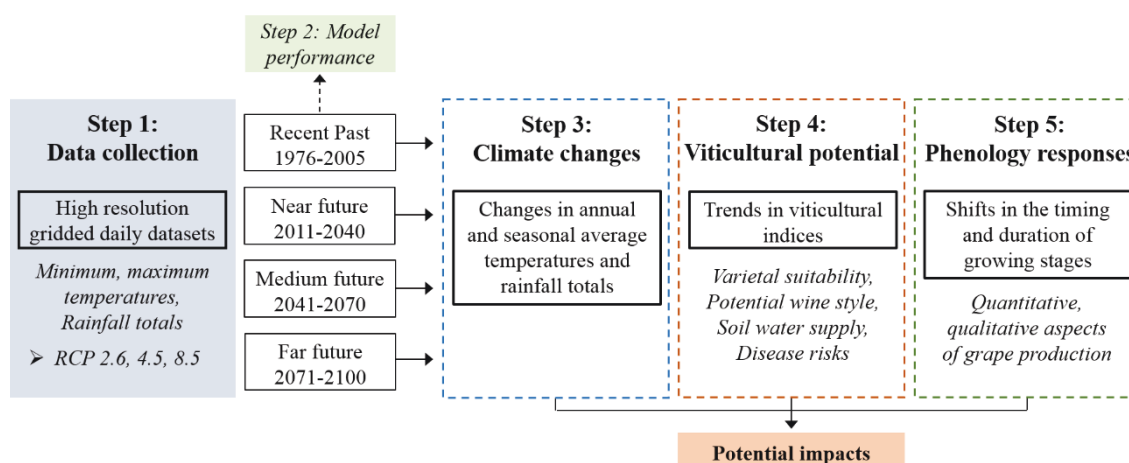


Figure 33: Methodological framework developed for the assessment of projected climate changes and their potential impacts on viticulture in Anjou-Saumur.

4.1.1. Simulated data and projections

High resolution climate simulations were acquired within the framework of the DRIAS project (Lémond et al. 2011). These simulations are derived from the limited area model ALADIN-Climate (ALADIN-Climat v5), which has a 12 km horizontal resolution forced at its lateral boundaries by the outputs of the global circulation model ARPEGE-Climate (Déqué and Piedelievre 1995; Déqué 2007). Detailed aspects on ALADIN-Climate and its experimental design are outlined in Herrmann et al. (2011). On the DRIAS portal, the ALADIN-Climate model outputs were bias corrected by a quantile-quantile method from the SAFRAN analysis (Vidal et al. 2010), and further downscaled to a spatial resolution of 8 km over France (<http://www.drias-climat.fr/>). These simulations were carried out as part of the CNRM2014 experiences on the Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios. Accordingly, for each 8 x 8 km² grid cell covering the study area (i.e. 70 grids in total), daily

simulated minimum and maximum temperatures, and rainfall totals were obtained for a reference scenario from 1976 to 2005 (i.e. most recent 30-year period available on the Drias portal), and for three RCP scenarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5), from 2011 to 2100. Each RCP scenario describe a different radiative forcing and greenhouse gas emission trajectory (Moss et al. 2010). For atmospheric CO₂ concentrations, they reach a peak and then decline to ~400 ppm in 2100 for the low emission scenario RCP 2.6 (Van Vuuren et al. 2011b); they stabilize at ~550 ppm by 2100 for the intermediate scenario RCP 4.5 (Thomson et al. 2011); they continue to increase, reaching ~950 ppm in 2100 for the high emission scenario RCP 8.5 (Riahi et al. 2011).

4.1.2. Data analyses and assessment methods

Daily gridded datasets were divided into four subsets, each subset consisting of a 30-year timeline: recent past (1976-2005), near future (2011-2040), medium future (2041-2070) and far future (2071-2100). These subsets were used in all the subsequent assessments of climate changes, viticultural potentials and phenology responses. The relationship between expected climate changes and viticultural potential was studied through the use of various single and multi-factorial indices, which have been extensively used to define a region's potential to produce grapes, to predict varietal suitability or potential wine style, or to identify environmental risks (e.g. drought, diseases). The following indices were studied: Growing Season average Temperature index (GST), Huglin Index (HI), Biologically Effective Degree-Day index (BEDD) and Cold night Index (CI). In addition to these temperature-based indices, four indices integrating rainfall were also applied: Growing Seasonal total Rainfall index (GSR), Hydrothermal index (Hyl), Dryness Index (DI) and Rainfall Frequency index (RF), which refer to the frequency of rainy days (i.e. ≥ 1 mm) during the growing season (1 April to 31 October). Table 3 illustrate the mathematical equations and references for each index³⁴.

However, viticultural indices do not define how climate conditions are distributed during the growing season (e.g. warm/cold or dry/wet periods), which are key parameters determining both the quantitative (e.g. yield) and qualitative (e.g. composition) aspects of grape production. Accordingly, it is necessary to partition the growing season into smaller growth intervals (Coulon et al. 2011; Real et al. 2015), allowing to evaluate how temperature and rainfall conditions occur and are likely to change over time, and how they may affect grape quality and productivity. To that end, the grapevine flowering veraison (GFV) model was used to predict the dates of flowering, veraison (Parker et al. 2013) and the ripening stage with an estimated sugar concentration of 200g/L (Parker 2012). This study analysis was undertaken for three white varieties: Chardonnay (CHA), Sauvignon blanc (SAU), Chenin (CHE); and three red varieties; Gamay (GAM), Cabernet franc (CAF), Cabernet Sauvignon (CAB); all six are cultivated in Anjou-Saumur. Under the same climate, these varieties can also be sorted into three groups according to their ripening period. In this study, Chardonnay, Sauvignon blanc and Gamay were denoted as early ripening varieties, Chenin and Cabernet franc as medium ripening varieties and Cabernet Sauvignon, as a late ripening variety. The heat requirements for the three red varieties are illustrated in Figure 34.

³⁴ See Annex 1 for their respective climate classes

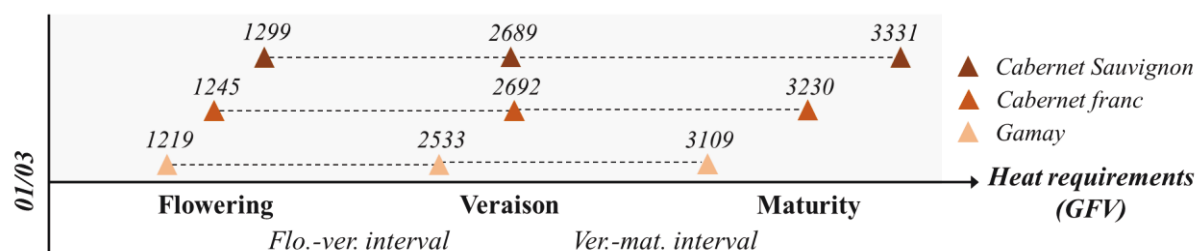


Figure 34: Heat requirements (as calculated from 1 March) for three red grapevine varieties, Gamay, Cabernet franc and Cabernet Sauvignon according to the Grapevine Flowering Veraison (GFV) model (adapted from Real et al. 2015).

In this study, budburst was not considered given the difficulty in modeling its occurrence. Indeed, budburst depends on both chilling and forcing temperatures (García de Cortázar-Atauri et al. 2009), as well as spring soil temperatures in the root zone (Morlat and Jacquet 1993) or viticultural practices such as pruning time (Martin and Dunn 2000).

Table 3: Agroclimatic indices used to assess climate change impacts on viticulture (Tn, Tx and Tm refer to daily minimum, maximum and average temperatures, and P to daily rainfall totals).

Viticultural Indices	Equation for the Northern Hemisphere	References
Growing season average temperature index (GST, °C)	$\sum_{01/04}^{31/10} \left[\frac{(Tx+Tn)}{2} \right] / (n=214)$	Jones et al. 2005
Winkler Index (GDD, °C units)	$\sum_{01/04}^{31/10} \text{Max} \left[\frac{(Tx+Tn)}{2} - 10, 0 \right]$	Winkler et al. 1974
Huglin Index (HI, °C units) ^a	$\sum_{01/04}^{30/09} \text{Max} \left[\frac{(Tm-10)+(Tx-10)}{2}, 0 \right] k$	Huglin 1978
Biologically effective degree-day index (BEDD, °C units) ^a	$\sum_{01/04}^{31/10} \text{Min} \left[\text{max} \left(\frac{(Tx+Tn)}{2} - 10, 0 \right) k + TR, 9 \right]$	Gladstones 1992
Cold Night Index (CI, °C)	$\sum_{01/09}^{30/09} [Tn] / (n=30)$	Tonietto and Carbonneau 2004
Growing season total rainfall index (GST, °C)	$\sum_{01/04}^{31/10} [P]$	
Hydrothermal Index (Hyl, °C mm)	$\sum_{\text{Apr}}^{\text{Aug}} [Tm \times P]$	Branas et al. 1946
Dryness Index (DI, mm) ^{b, c}	$\sum_{\text{Apr}}^{\text{Sept}} [Wo + P - Tv - Es]$	Tonietto and Carbonneau 2004
Growing season rainfall frequency (RF, event/day)	$\sum_{01/04}^{31/10} [P \geq 1] / (n=214)$	

^ak refer to an adjustment for latitude/day length. See Hall and Jones (2010) for calculation details

^bTv is potential transpiration from vine, Es is direct evapotranspiration from soil (Riou et al. 1994)

^cPotential evapotranspiration was estimated according to Hargreaves and Samani (1985)

4.1.3. Model performance and uncertainties

In conducting climate change impact assessments, it is important to account for uncertainties. According to Hawkins and Sutton (2009), uncertainty in climate predictions arise mainly from three sources: emission scenario, model response and internal variability. For the former, projected changes under all three emission scenarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5) will

be compared, in order to illustrate the range in expected future climate changes. To assess uncertainties associated with model outputs, simulated data³⁵ for the recent past were compared with observed temperature and rainfall records from two regional weather stations of Météo France, located at Angers and Montreuil-Bellay (Figure 32). Table 4 show the statistical differences between observed and simulated annual average, minimum and maximum temperatures, and annual rainfall totals. For both Angers and Montreuil-Bellay, simulated annual average temperatures were significantly different from observations ($p < 0.05$), mainly because maximum simulated temperatures were strongly underestimated. Indeed, minimum near-surface temperatures have been accurately modeled in many studies, given the strong relationship between nocturnal cooling and terrain elevation. Whereas for maximum near-surface temperatures, many local factors (e.g. terrain aspect, landscape openness,...) influences direct and diffuse solar radiation intensities, and therefore the measurement of diurnal temperatures.

Lastly, uncertainty arising from internal variability can be very important, especially in the near future or for rainfall projections (Hawkins and Sutton 2009). In order to account for this uncertainty, the distribution of studied climate variables and viticultural indices were represented by box plots, describing the values of the median and interquartile range (IQR). Outliers were considered to be any value that falls more than 1.5 interquartile ranges below the first quartile or above the third quartile. These box plots were elaborated for the gridded datasets encompassing Angers and Montreuil-Bellay, which are representative of the regional climate structure of Anjou-Saumur (Neethling et al. 2012).

Table 4: Differences between simulated and observed annual climate variables for the recent past reference period (1976-2005).

CLIMATE VARIABLES	ANGERS					MONTREUIL-BELLAY				
	Obs. ^a	Sim. ^b	Bias ^c	F ^d	t ^e	Obs. ^a	Sim. ^b	Bias ^c	F ^d	t ^e
Annual temperature										
Average (°C)	12,1	11,7	+0,4	ns	s	12,2	11,8	+0,4	ns	s
Minimum (°C)	7,8	7,9	-0,1	ns	ns	7,7	8,1	-0,4	ns	s
Maximum (°C)	16,5	15,5	+1,0	ns	s	16,8	15,4	+1,4	ns	s
Annual rainfall										
Total (mm)	686,4	615,5	+70,9	ns	s	574,1	570,4	+3,7	ns	ns

^aObs. = Observed average from 1976 to 2005; ^bSim. = Simulated average from 1976 to 2005

^cDifference between observed and simulated data

^dF: Significance value by Fisher's test; ns = non-significant ($P > 0,05$); s = significant ($P < 0,05$)

^et: Significance value by Student's paired t-test; ns = non-significant ($P > 0,05$); s = significant ($P < 0,05$)

4.2. Results

Across the Anjou-Saumur wine-growing sub-region, model outputs for the recent past (1976-2005) illustrate that annual average temperatures ranges between 11.0°C and 11.9°C (Figure 35), distributed mainly as a function of grid cell altitude values ($R^2=0.88$). The

³⁵ Grid cell closest to the observation weather station.

warmest annual average temperatures were simulated in the valley of the Loire River. During this period, the mean annual average temperature for Anjou-Saumur was 11.6°C (i.e. all 70 grid cells), which warmed by +1.0°C from 1976 to 2005. This warming trend is slightly underestimated, as compared to the observed increase in annual average temperatures in Angers (+1.4°C) and Montreuil-Bellay (+1.8°C). Moreover, model outputs show that annual rainfall totals varied between 567.6 mm and 726.3 mm from 1976 to 2005, distributed according to grid cell altitude values ($R^2=0.39$) and to a lesser extent, the degree of continentality³⁶ ($R^2=0.21$). During this period, the mean annual total rainfall was 628.4 mm and no significant change in rainfall was recorded, results that are similar to historical observations in Angers and Montreuil-Bellay.

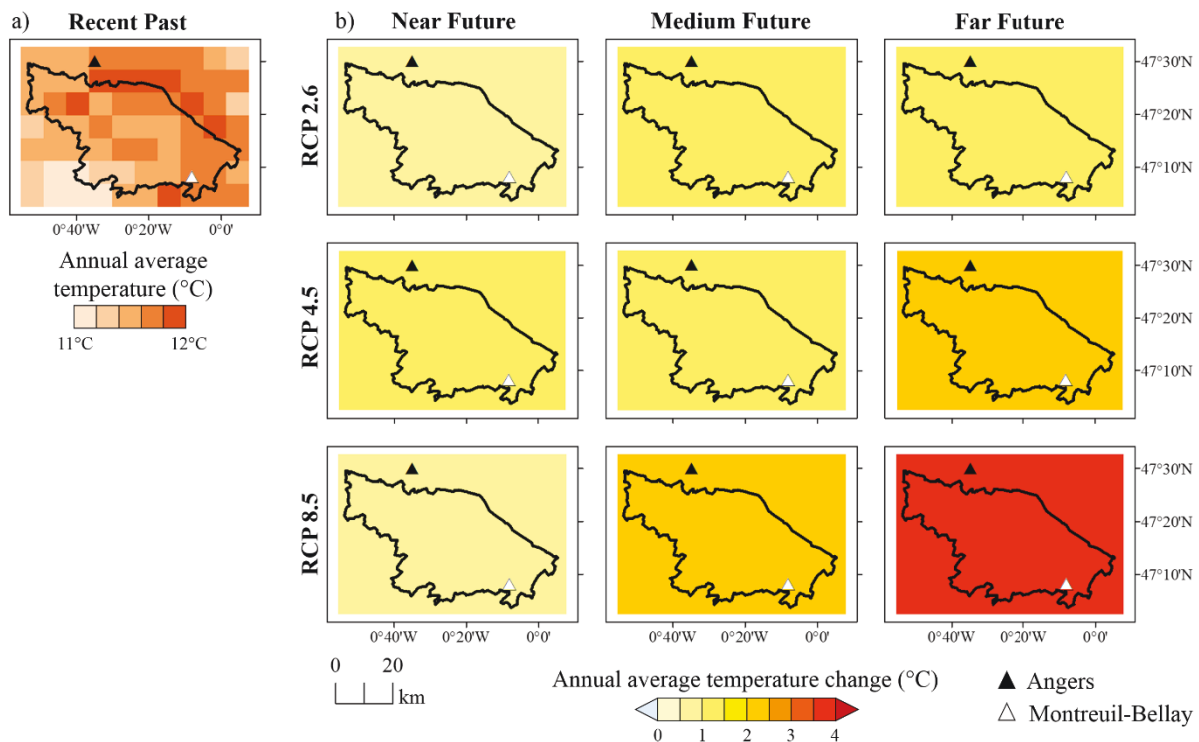


Figure 35: a) Simulated annual average temperatures for Anjou-Saumur from 1976 to 2005, b) Compared to the recent past, the projected changes in average annual temperatures in the near (2011-2040), medium (2041-2070) and far future (2071-2100) under the low (RCP 2.6), intermediate (RCP 4.5) and high emission scenario (RCP 8.5).

4.2.1. Changes in average annual and seasonal temperatures

Relative to the recent past, the climate of Anjou-Saumur is expected to continue rising. Average annual temperatures are projected to increase: by +0.8°C to +1.1°C in the near future (2011-2040); and by +1.1°C to +2.0°C in the medium future (2041-2071); and by +1.1°C to +3.8°C in the far future. Accordingly, if current greenhouse gas emissions continue, as projected under the RCP 8.5, average annual temperatures are likely to rise by +4°C by 2100. Across Anjou-Saumur, there are no significant geographical differences, with each grid cell

³⁶ Distance to the Atlantic Ocean

illustrating similar warming trends. Results not shown here indicate that the spatial variability in average annual temperatures across the study area remain about 1°C, regardless of the time scale or emission scenario. The Figure 36 illustrate the annual average temperature anomalies for the grid cells encompassing Angers and Montreuil-Bellay. Despite a strong inter-annual variability over time, long term warming trends are visible. Under the RCP 2.6, average annual temperatures increases until ~2050, remaining then stable over time. For the RCP 8.5, a significant warming trend is observed ($R^2=0.82$ for Angers and $R^2=0.80$ for Montreuil-Bellay), indicating unprecedented temperatures from 2050 and onward. These results are consistent with the study of Mora et al. (2013), who indicated that from the middle of this century, i.e. under the business-a-usual RCP 8.5 scenario, projected temperatures will move to a state continuously outside the bounds of historical variability.

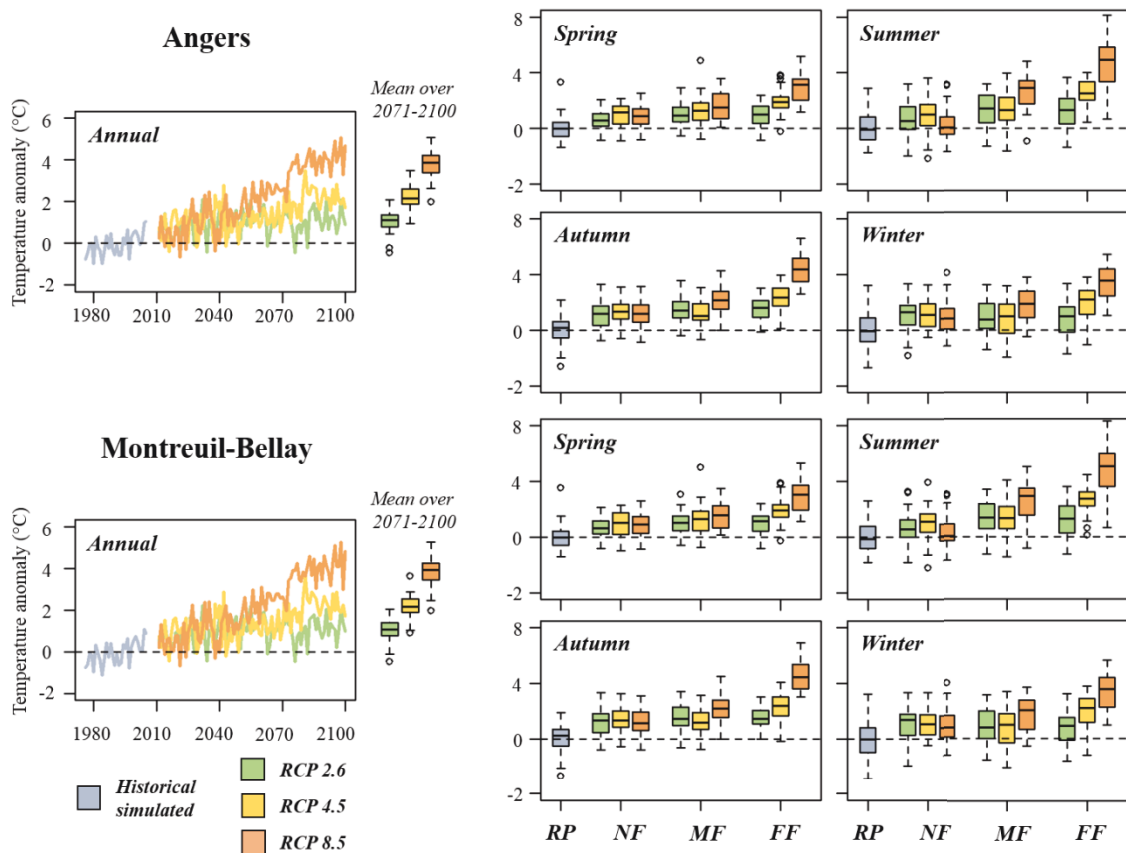


Figure 36: Relative to the recent past (RP), average annual and seasonal temperature anomalies (°C) in the near (NF), medium (MF) and far future (FF) for the grid cells encompassing the weather stations of Angers and Montreuil Bellay. Seasons are calculated over a three month period, Spring (MAM), Summer (JJA), Autumn (SON) and Winter (DJF).

Over the 21st century, all seasons illustrate a general warming trend. In the near future, warming is likely to occur the strongest in autumn and winter. Relative to the recent past, average seasonal temperatures, as indicated by Angers, are expected to increase by +0.6°C to +0.9°C for spring, by +0.6°C to +0.9°C for summer, by +1.1°C to +1.4°C for autumn, and by +1.0°C to +1.1°C for winter. In the far future, all seasons warm significantly, in particular during the summer and autumn. Relative to the recent past, average seasonal temperatures for

Angers are projected to increase by $+0.9^{\circ}\text{C}$ to $+2.9^{\circ}\text{C}$ for spring, by $+1.3^{\circ}\text{C}$ to $+4.8^{\circ}\text{C}$ for summer, by $+1.6^{\circ}\text{C}$ to $+4.4^{\circ}\text{C}$ for autumn, and by $+0.7^{\circ}\text{C}$ to $+3.3^{\circ}\text{C}$ for winter. The extent of future warming in summer months implicate also an increase in the frequency and intensity of extreme summer temperatures. Results not shown here show that over summer, the number of days with maximum temperatures higher than 35°C are expected to increase by +1 day (RCP 2.6) to +12 days (RCP 8.5) in the far future for Montreuil-Bellay. At the same time, warmer spring temperatures signify less number of days with minimum temperatures lower than 0°C . For Montreuil-Bellay, spring frost days are projected to decrease -1 (RCP 2.6) to -4 (RCP 8.5) days in far future. In France, Jouzel et al. (2014) demonstrated that the number of heat wave days are likely to exceed 20 days under the RCP 8.5 scenario, while extreme cold days are to decrease by 6 to 10 days. Indeed, the expected shift in future temperatures are both a change in the mean and a change in the frequency and intensity of extreme heat events (Donat and Alexander 2012; Hansen et al. 2012).

4.2.2. Projected changes in total annual and seasonal rainfall

The projected changes in annual rainfall totals are more complex, both over time and space. Relative to the recent past, expected trends in rainfall totals show increases in the near future and decreases in the far future, with greater geographical differences (Figure 37).

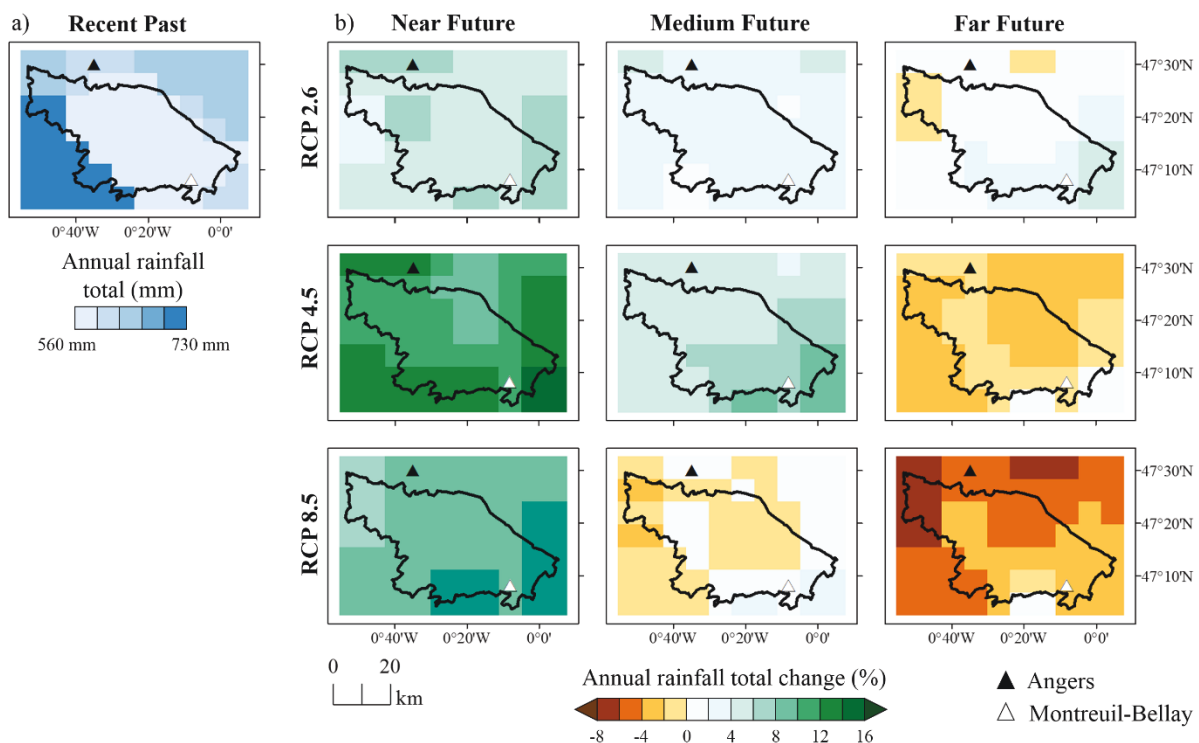


Figure 37: a) Simulated annual rainfall totals for Anjou-Saumur from 1976 to 2005, b) Compared to the recent past, the projected changes in annual rainfall totals in the near (2011-2040), medium (2041-2070) and far future (2071-2100) under the low (RCP 2.6), intermediate (RCP 4.5) and high emission scenario (RCP 8.5).

In the near future (2011-2040), the annual rainfall total of Anjou-Saumur (i.e. all 70 grid cells) is projected to increase by $+5.4\%$ to 11.8% , whereas in the far future (2071-2100), the

change in annual rainfall total of Anjou-Saumur is likely to be small (+1.6%, RCP 2.6) or to decrease by -2.0% (RCP 4.5) to -4.4% (RCP 8.5). Figure 38 indicate that this is primarily because annual and seasonal rainfall are largely driven by natural year-to-year variations over time, and for all three scenarios, there are no long term shifts in rainfall patterns.

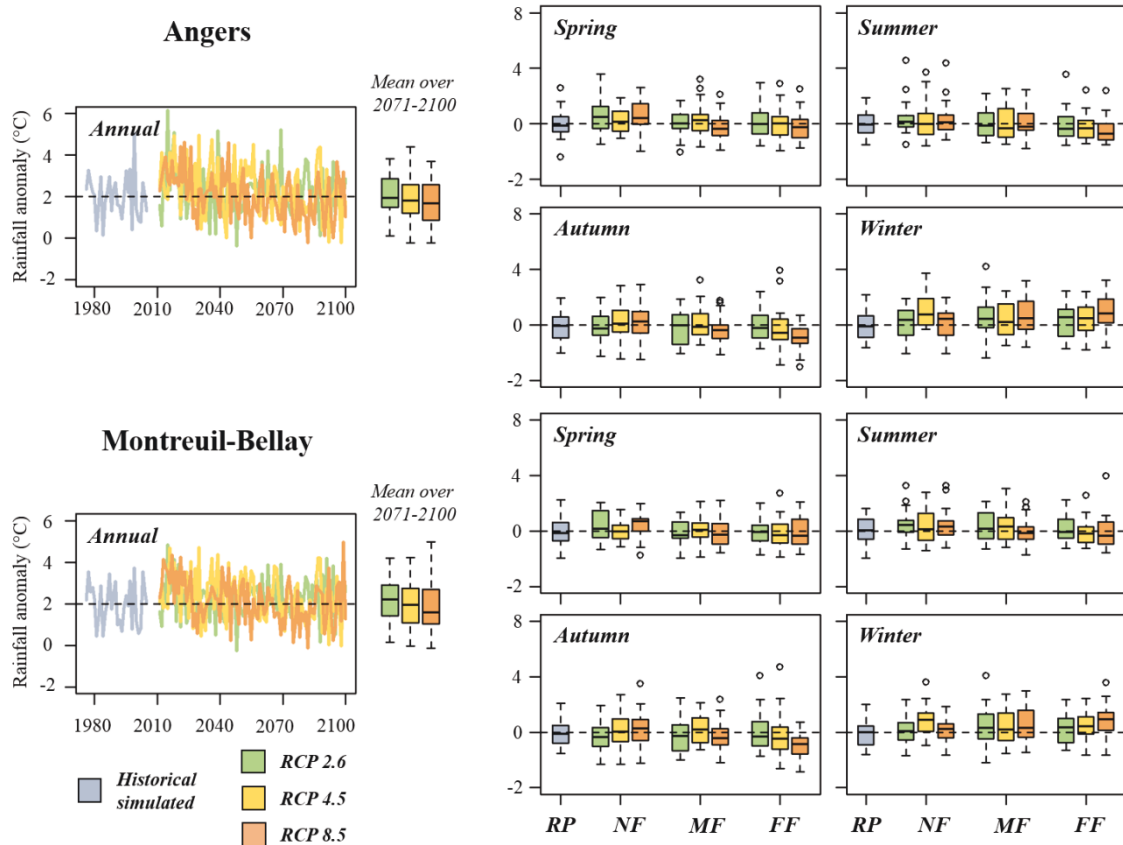


Figure 38: Relative to the recent past (RP), total annual and seasonal rainfall anomalies (°C) in the near (NF), medium (MF) and far future (FF) for the grid cells encompassing the weather stations of Angers and Montreuil Bellay. Seasons are calculated over a three month period, Spring (MAM), Summer (JJA), Autumn (SON) and Winter (DJF).

These results are consistent with the findings made by Jouzel et al. (2014) on the regional outputs of rainfall over France, where they have shown large uncertainties associated with changes in rainfall. Relative to the period of 1976 to 2005, they indicated a slight increase in summer and winter rainfall from 2021 to 2050, ranging between 0 mm/day and 0.42 mm/day on average for France, with a strong uncertainty about the geographical distribution of this predicted change. Towards the end of this century (2071-2100), they indicated an increase in winter rainfall by 0.1 mm/day to 0.85 mm/day depending on the climate model and emission scenarios. For the predictions in summer rainfall by 2100, contrasting results were shown according to the climate model used. The Aladin-Climate model simulated a decrease in summer rainfall over France (between -0.16 and -0.38 mm/day), whereas the WRF model simulated an increase (between +0.15 and +0.32 mm/day). Conducting high-resolution climate change projections for Europe, Jacob et al. (2014) illustrated significant changes in annual rainfall totals for the lower and higher latitudes of Europe, but little to no shifts in

rainfall patterns for the middle latitudes (45°N to 50°N). Therefore, a large part of France and as a result, Anjou-Saumur, is located between the predicted increases in rainfall for northern Europe, and the predicted decreases in rainfall for southern Europe, causing uncertainty in future rainfall projections.

4.2.3. Future trends in viticultural indices

With predicted warming in annual and seasonal temperatures, important changes in temperature-based indices are expected over the 21st century (Figure 39). Relative to the recent past, the projected increases for each index in the near, medium and far future are illustrated in Table 5. Consistent with findings in many wine growing regions (Webb et al. 2007; Malheiro et al. 2010; Ruml et al. 2012; Briche et al. 2014; Cabré et al. 2016), results demonstrate that the viticultural climate class of Anjou-Saumur is predicted to change significantly. According to the Winkler Index, Anjou-Saumur is likely to shift from a “Region Ib” to a “Region II” in the medium future (for all scenarios), while to a “Region III” (RCP 4.5) or a “Region IV” (RCP 8.5) in the far future.

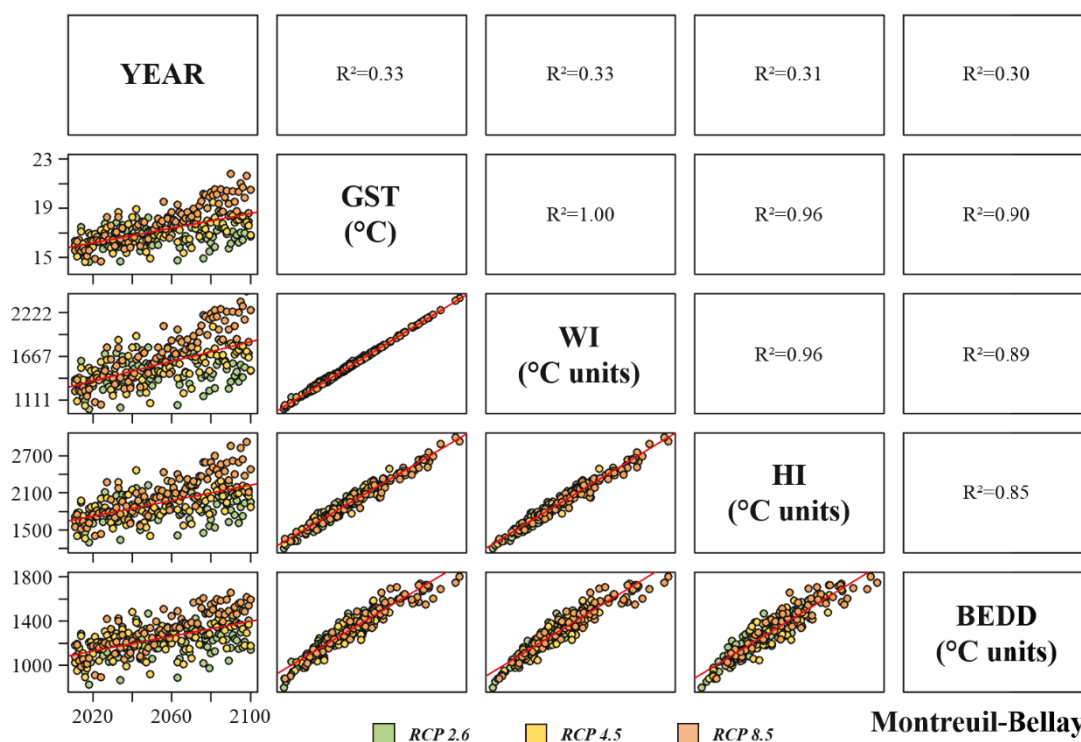


Figure 39: Matrix scatterplot illustrating the linear trends in Growing Season Temperature index (GST, °C), Winkler Index (WI, °C units), Huglin Index (HI, °C units) and Biologically Effective Degree-Day index (BEDD, °C units) as a function of time (YEAR). The corresponding coefficient of determination, R^2 , for each linear model are also shown. The results are from the grid cell encompassing Montreuil-Bellay.

Concerning rainfall totals during the growing season (GSR), the overall results display no significant long term changes (Table 5), and therefore consistent with the findings in annual and seasonal rainfall patterns. However, rainfall distribution over the growing season, as revealed by the rainfall frequency index (RF), is likely to change significantly. In the near

future, the number of wet days are predicted to increase by about +14%, whereas in the far future, the number of wet days are projected to decrease by -10.7% to -28.6%. These results indicate that while annual or seasonal rainfall totals may not change significantly, heavier rainfall amounts are predicted in the near and especially, in the far future. Referring to the study of Jouzel et al. (2014), extreme rainfall occurrence may increase by +5%, and even by +10% for certain parts of France.

Table 5: Relative to the recent past (RP), the trends in viticultural indices in the near (NF), medium (MF) and far future (FF) for the grid cells encompassing the weather stations of Angers and Montreuil-Bellay. Results for all three emission scenarios are illustrated (RCP 2.6, 4.5, 8.5)

Grid Cell	Viticultural Indices	RP	NF			MF			FF		
			2.6	4.5	8.5	2.6	4.5	8.5	2.6	4.5	8.5
ANGERS	GST (°C)	15.4	16.1	16.4	16.1	16.7	16.7	17.7	16.7	17.7	19.7
	WI (GDD)	1210	1345	1405	1344	1457	1457	1664	1470	1670	2087
	HI (°C units)	1605	1723	1800	1727	1852	1860	2064	1866	2076	2460
	BEDD (°C units)	1047	1125	1165	1138	1212	1185	1317	1219	1322	1521
	CI (°C)	11.3	12.3	12.5	12.5	12.7	12.8	13.7	12.9	13.9	16.0
	GSR (mm)	327.9	371.1	336.7	367.3	326.3	336.1	300.9	316.8	296.9	259.8
	DI (mm)	90	86	76	87	72	74	46	56	42	2
	Hyl (°C mm)	3030	3942	3554	3741	3545	3533	3499	3275	3177	3414
	RF (event/day)	0.28	0.32	0.29	0.32	0.27	0.29	0.26	0.27	0.25	0.21
MONTREUIL-BELLAY	GST (°C)	15.5	16.3	16.6	16.3	16.8	16.8	17.8	16.8	17.9	19.9
	WI (GDD)	1228	1370	1433	1370	1492	1481	1690	1492	1706	2115
	HI (°C units)	1608	1731	1812	1734	1872	1866	2071	1870	2092	2460
	BEDD (°C units)	1047	1132	1172	1143	1223	1186	1312	1221	1325	1518
	CI (°C)	11.7	12.7	12.9	12.9	13.1	13.2	14.1	13.2	14.3	16.4
	GSR (mm)	309.7	344.9	316.5	353.2	315.4	327.0	290.2	311.0	282.3	268.9
	DI (mm)	88	89	75	89	75	83	50	65	44	16
	Hyl (°C mm)	3030	3824	3423	3615	3572	3479	3271	3298	3045	3734
	RF (event/day)	0.28	0.30	0.28	0.31	0.26	0.28	0.24	0.25	0.24	0.20

Values are given in bold if significantly different from recent past (Student's paired t-test; $P < 0.05$)

According to the MCC system (Tonietto and Carbonneau 2004), the climate of Anjou-Saumur during the recent past was a cool and sub-humid climate, with very cool nights during ripening. Over the 21st century, the Huglin Index (IH) and the Cold night Index (CI) are expected to significantly change. The HI index, conceived to provide a minimum required value for different grapevine varieties to reach adequate sugar levels (i.e. 200 g/L), is likely to shift from a “cool” to a “temperate” climate class in the medium future, or to a “warm” climate by 2071-2100 for the RCP 8.5. To that end, Anjou-Saumur is expected to evolve from a suitable climate for early ripening varieties (e.g. Gamay) to a climate suitable for medium ripening varieties such as Chenin and Cabernet franc. Under the scenario RCP 8.5, it may also become suitable for late ripening varieties (e.g. Syrah, Grenache) by 2071-2100. The Cold night Index (CI), developed to provide additional information on the incidence of thermal conditions during ripening, is predicted to rise by +1.0°C to +1.2°C for 2011-2040, by +1.4°C to +2.4°C for 2041-2070 and by +1.6°C to +4.7°C for 2071-2100 (Table 5). Relative to the recent past, the CI index is expected to shift from “very cool nights” to “cool nights” during ripening in the near future, or even to “temperate nights” in the far future for the RCP 8.5. The Dryness Index (DI), which estimate the amount of soil water available at the end of the

growing season, illustrate no trend in the near and medium future, except for the RCP 8.5. In the far future, the DI is projected to significantly decrease compared to the recent past and accordingly, may cause Anjou-Saumur to transition from a sub-humid to a moderately dry climate.

4.2.4. Phenology responses to projected warming: Example of Montreuil-Bellay

Apart from environmental stresses (e.g. drought, diseases), physiological processes such as photosynthesis are very sensitive to variations in temperatures, which over time, govern the rhythm of the grapevine behavior. Indeed, many studies have illustrated that grapevine phenology is well correlated (i.e. positively) with heat accumulation (Jones and Davis 2000; Duchêne and Schneider 2005; Tomasi et al. 2011). With regional warming and significant increases in heat sums (e.g. Winkler Index), grapevine phenology is expected to strongly respond. The Table 6 show the phenological tendencies for six varieties grown in Anjou-Saumur. Regardless of the variety or emission scenario, results show that flowering, veraison and maturity stages advances significantly over time.

Table 6: Modeled dates (i.e. in day of year, DOY) for flowering, veraison and maturity (200g/L) according to their heat requirements (Parker 2012; Parker et al. 2013). Results correspond to the grid cell dataset covering Montreuil-Bellay.

	Variety ^a	RP	NF			MF			FF		
			2.6	4.5	8.5	2.6	4.5	8.5	2.6	4.5	8.5
FLOWERING (DOY)	CHA	167	163	161	162	160	160	157	162	156	150
	SAU	171	167	165	166	164	164	161	165	159	154
	CHE	171	166	165	166	164	163	161	165	159	154
	GAM	167	163	161	162	160	160	157	162	156	150
	CAF	169	164	163	164	162	161	159	163	157	152
	CAB	172	168	166	167	165	165	162	166	160	155
VERAISON (DOY)	CHA	237	232	229	232	227	226	220	227	219	210
	SAU	236	231	228	231	226	225	220	227	218	209
	CHE	245	239	237	240	235	233	227	235	226	217
	GAM	236	231	228	231	226	225	220	227	219	209
	CAF	244	238	236	239	234	233	227	234	225	216
	CAB	244	238	236	239	233	232	226	234	225	216
MATURITY (DOY)	CHA	269	260	257	261	254	253	245	255	243	232
	SAU	269	260	257	261	254	253	245	255	243	232
	CHE	272	263	259	263	256	255	247	257	245	234
	GAM	270	261	257	261	254	253	245	255	244	232
	CAF	278	268	264	268	261	260	251	262	249	237
	CAB	285	275	271	274	267	265	256	267	254	241

Values are given in bold if significantly different from recent past (Student's paired t-test; $P < 0.05$)

^aVarieties studied are Chardonnay (CHA), Sauvignon blanc (SAU), Chenin (CHE), Gamay (GAM), Cabernet franc (CAF), and Cabernet Sauvignon (CAB).

Relative to the recent past, modeled flowering and veraison dates are expected to advance by 4 to 6 days and by 5 to 8 days respectively in the near future, and by 5 to 17 days and by 9 to 28 days respectively in the far future (Table 6). Compared with flowering and veraison, modeled maturity dates (i.e. when sugar levels of 200 g/L are reached) are predicted to advance the strongest over time. In the near future, it may advance by 8 to 14 days, and in the far future, by 14 to 44 days. The latter refers to the projected changes under the RCP 8.5,

which indicate that for early ripening varieties, e.g. Gamay, harvests may occur around August 20 ± 9 days, and for Cabernet Sauvignon (i.e. late ripening variety), around August 29 ± 9 days by 2071-2100 (Figure 40). For modeled flowering and veraison dates, there was little to no differences in the predicted advances between early, medium and late ripening varieties, indicating a range of ~ 5 days between varieties for flowering and a range of ~ 8 days for veraison, regardless of the time scale or emission scenario. However, modeled maturity dates were projected to advance stronger for Cabernet Sauvignon, than for early ripening varieties. Earlier occurrences in phenological stages are also expected to be accompanied by a shortening of phenological intervals (Figure 40). In the far future, the flowering-veraison interval for Gamay is projected to decrease by 4 to 10 days by 2071-2100, while for Cabernet Sauvignon, to decrease by 4 to 11 days. At the same time, the veraison-maturity interval for Gamay is likely to decrease by 6 to 11 days and by 8 to 16 days for Cabernet Sauvignon.

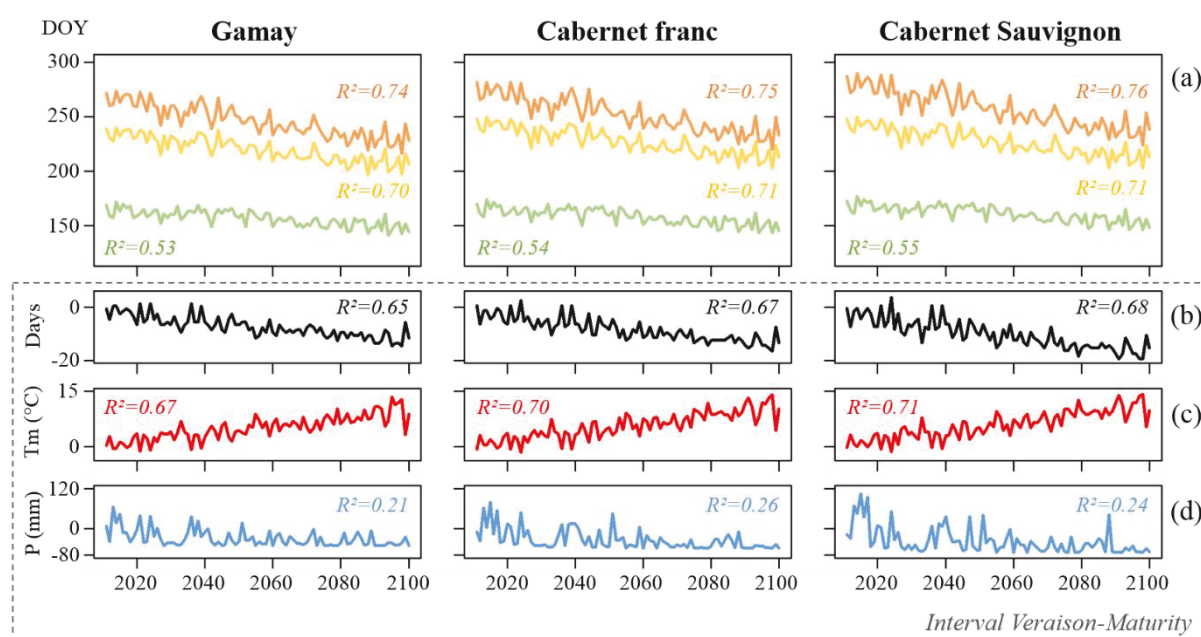


Figure 40: From 2011 to 2100 and for the RCP 8.5: (a) Trends in flowering, veraison and maturity (200g/L) dates (Day of year, DOY) for Gamay, Cabernet franc and Cabernet Sauvignon; and relative to the recent past (1976-2005), the anomaly in (b) veraison-maturity length, (c) average temperature and (c) total rainfall.

Over the 21st century, climate conditions during the studied phenological intervals are predicted to be greatly modified. For the flowering-veraison interval, all varieties indicated significant increases in average temperatures, but no long-term trends in rainfall totals (Table 7). For the veraison-maturity interval, significant changes in both average temperatures and rainfall totals were revealed, in particular from the medium to far future. These modeled modifications vary between early to late ripening varieties, with climate conditions for Cabernet Sauvignon likely to evolve the most significant. Relative to the recent past, average temperatures during the flowering-veraison interval are expected to rise by $+0.9^{\circ}\text{C}$ to $+3.0^{\circ}\text{C}$ for Gamay, and by $+1.1^{\circ}\text{C}$ to $+3.3^{\circ}\text{C}$ for Cabernet franc and by $+1.2^{\circ}\text{C}$ to $+3.5^{\circ}\text{C}$ for Cabernet Sauvignon by 2071-2100. Whereas for the veraison-maturity interval, average

temperatures are likely to increase by +3.0°C to +8.1°C for Gamay, by +3.3°C to +9.2°C for Cabernet franc and by +3.6°C to +9.6°C for Cabernet Sauvignon by 2071-2100 (Table 7).

Table 7: Projected changes in average temperatures (T_m , °C) and rainfall totals (P, mm) for the flowering-veraison and veraison-maturity intervals for three red varieties. Results correspond to the grid cell dataset covering Montreuil-Bellay.

		Variety ^a	RP	NF			MF			FF		
				2.6	4.5	8.5	2.6	4.5	8.5	2.6	4.5	8.5
FLOWERING- VERAISON	T_m (°C)	GAM	19.3	19.4	19.6	19.2	20.1	20.3	21.1	20.2	20.8	22.3
		CAF	19.3	19.6	19.8	19.4	20.2	20.5	21.4	20.4	21.2	22.6
		CAB	19.3	19.7	20.0	19.5	20.3	20.6	21.5	20.5	21.3	22.8
	P (mm)	GAM	74.8	97.9	91.3	89.7	92.1	88.0	75.4	76.5	77.3	77.3
		CAF	81.2	98.2	96.3	95.0	93.0	92.1	76.0	79.5	77.5	78.8
		CAB	75.9	91.1	90.3	89.2	88.0	85.8	68.8	71.3	71.8	72.6
VERAISON- MATURITY	T_m (°C)	GAM	17.4	19.7	20.4	19.4	20.5	20.7	22.6	20.4	23.2	25.5
		CAF	16.5	18.6	19.5	18.6	19.9	20.0	22.1	19.8	22.7	25.7
		CAB	15.9	18.2	19.0	18.3	19.5	19.6	21.7	19.5	22.2	25.5
	P (mm)	GAM	51.0	32.6	32.8	38.0	20.7	25.4	16.1	25.9	14.4	11.8
		CAF	58.9	36.2	31.9	44.8	28.4	25.1	21.8	30.4	18.4	9.8
		CAB	71.1	46.5	39.7	57.9	39.4	32.4	28.1	41.4	22.9	16.1

Values are given in bold if significantly different from recent past (Student's paired t-test; $P < 0.05$)

^aVarieties studied are Gamay (GAM), Cabernet franc (CAF), and Cabernet Sauvignon (CAB)

4.3. Discussion

The assessment of the projected trends in climate variables and viticultural indices in Anjou-Saumur is an important aspect of formulating an understanding of the potential impacts on viticulture in the near to far future. At the scale of Anjou-Saumur, the study analysis suggest that the region's climate is likely to continue warming, causing a transition from its tradition cool viticultural climate to a temperate climate. While no significant increase or decrease in annual and seasonal rainfall patterns were observed, soil water regimes may evolve strongly towards the end of this century. However, Anjou-Saumur is characterized by a great diversity, which suggest that within this sub-region, a changing climate may bring about both risks and opportunities. To evaluate these important consequences on viticulture, Anjou-Saumur can be divided into three groups according to the type of grapevine variety cultivated, the type of soil on which vines are planted and grown, and lastly, the type of wine produced.

Type of grapevine variety:

Projected trends in viticultural indices suggest that medium ripening varieties (e.g. Chenin, Cabernet franc) will become more suitable by 2041 to 2070. In the recent past, and long before, Chenin and Cabernet franc have reached ripeness, more regularly during warm than cool growing seasons. Yet, many viticultural practices were used (i.e. annual and perennial) to overcome the shortcomings of the historical climate. These practices included selecting vineyards sites with warm local climates, rootstocks inducing an early vine growth or removing severely leaves to improve the microclimate. Warming in the medium future is predicted to bring many opportunities, by ensuring the heat requirements of medium ripening varieties. To that end, Cook and Wolkovich (2016) have shown that

climate change has decoupled drought as a primary climatic driver of early harvests in France. They explained that anthropogenic warming has generated the high temperatures needed for harvests to occur earlier. For early ripening varieties (e.g. Gamay, Chardonnay) already suitable in Anjou-Saumur, expected temperature changes are likely to bring many risks. In this context, these varieties would still reach ripeness, but many quality issues may rise. Grapevine varieties should be grown in climates that ensure their heat requirements, but to that end, where ripeness is reached during the cooler months of September (Northern hemisphere) or March (Southern hemisphere) (Jackson and Lombard 1993). Cultivated under these climate conditions, grapes are expected to have balanced sugar and acidity levels, and full phenolic and flavor ripeness (Van Leeuwen et al. 2009). For this reason, as demonstrated in France, varieties are generally grown at their northern limits. Accordingly, the risks surrounding grape quality in early ripening varieties are that they may reach ripeness earlier as heat requirements are achieved. As a result, ripening will occur in a warmer period of the year, where higher temperatures should alter significantly grape composition. Furthermore, study results have likewise shown that warming during the veraison-maturity interval will rise strongly, which further should reduce grape quality. And lastly, under the high emission scenario, Anjou-Saumur is projected to become more suitable for late ripening varieties currently grown in the Rhone Valley (Syrah, Grenache), bringing similarly risks for grape quality in Chenin and Cabernet franc.

Type of soil:

The dryness index has shown that from the medium to far future, there is a general tendency towards lower soil water reserves. Except for the near future, the rainfall frequency index has likewise indicated that the number of rainy days should decrease over time. According to these two studied indices, expected climate changes may bring many opportunities for viticulture in Anjou-Saumur. Indeed, Anjou-Saumur is structured by an oceanic climate with a regular rainfall pattern, which exposes viticulture to high levels of soil water and diseases. Expected increases in dry conditions should therefore favor grape and wine quality in Anjou-Saumur, since the highest quality wines were produced during the driest vintages in the past (e.g. 1976, 1990, 1995, 2005, 2010). However, within Anjou-Saumur, which has a great diversity in soil types, spatially there may be “winners” and “losers”. The former refers to vineyards planted on the sedimentary formation of the Bassin Parisien, which has deep soils with high water reserves. Whereas the latter corresponds to vineyards planted on the Massif Armoricaïn, where soils are mainly shallow with low water reserves. Traditionally, these soil types favored vine growth and grape ripening, especially for vineyards designated to produce sweet wines. Yet, many studies have shown that limited water supply induces severe water stress, constraining photosynthesis and sugar accumulation, and at the same time, reducing significantly yield (Matthews et Anderson 1988 ; Morlat et al. 1992 ; Kennedy et al. 2002 ; Van Leeuwen et al. 2009). The predicted increases in drought may therefore have significant influences on both the quantitative and qualitative aspects of vineyards planted on shallow soils with low water reserves.

Type of wine:

In Anjou-Saumur, 30 different wine-producing appellations are recognized, which signify that winegrowers produce high quality red, white or rosé, still or sparkling, dry or sweet wines (Barbeau 2008). As wine structure and flavor are much dependent on grape attributes at harvest (Cadot et al. 2012; Bindon et al. 2013), expected risks for early ripening varieties should translate on the wines produced from the grapes of these varieties. For example, Chardonnay is mainly used to produce sparkling wines, Sauvignon blanc, dry white wines and Gamay, rosé and red wines. For these wines, the level of acidity in harvest grapes are a key factor in the quality of wines. The predicted rises in ripening temperatures, and the shift towards a warmer period of the year, should bring many risks for wine quality as acidity levels are likely to decrease significantly under those conditions. Indeed, the loss in acidity, and more precisely in malic acid, from grape berries in response to increasing temperatures have been shown by many studies (Ruffner et al. 1976; Coombe and McCarthy 2000; Keller 2010, 2015). During the last two to three decades, acidity levels in all cultivated varieties in Anjou-Saumur have decreased significantly (Neethling et al. 2012). Having been challenged by recent warming trends, the French Institute of the Vine and Wine in Anjou-Saumur has already initiated a selection of Sauvignon Blanc and Chenin clones, which are characterized by higher acidity levels. The selection of Chenin clones is for the production of sparkling wines. On the other hand, wines produced from medium ripening varieties are likely to increase in quality. Jones et al. (2005) have shown that vintage ratings for sweet wine production in the Loire Valley increases with growing season temperatures, but until an optimum threshold of 16.7°C. The latter referring to the balance between sugar and acidity levels. Apart from wine quality, a changing climate may also have important consequences on wine typicality, which refers to the concept of family resemblance, where the produced wine should have a set of biochemical and sensory attributes that are strongly related to its geographical origin (Cadot et al. 2012). In this context, all wines are likely to be sensitive to changes in wine typicality.

CONCLUSION

In the context of framing adaptation policies and strategies, this study has conducted an assessment of the projected climate changes and its expected impacts on viticulture in Anjou-Saumur. To that end, regionalized climate simulations were acquired for three emission scenarios. Results have shown that over the 21st century, Anjou-Saumur is expected to continue warming, resulting in its viticultural climate evolving from a cool to a temperate climate class. The greatest warming is predicted under the high emission scenario RCP 8.5, which places Anjou-Saumur in the far future, in a climate comparable with the current climate of the south of France. While no significant long term trends in rainfall patterns were observed, drought and rainfall distribution are likely to be modified.

As viticulture is very sensitive to climate variations, both temporally and spatially, a changing climate in Anjou-Saumur is expected to bring about many consequences on grapevine behavior (e.g. phenology), grape productivity and quality. These consequences are likely to vary strongly according to the type of grapevine variety cultivated, the type of soil on

which vines are planted and grown, and the type of wine produced, bringing about both opportunities and risks. In order to better understand the potential impacts of future climate changes, climate analogues may play an important role. To that end, Neethling et al. (2012) have shown that the observed growing season of 2003 was representative of modeled growing season temperatures in the medium future. On the other hand, comparisons should be made with warm climate wine growing regions currently cultivating varieties such as Chenin (e.g. South Africa) and Cabernet franc (Argentina). These regions are already adapting to climate conditions that are expected for Anjou-Saumur in the medium to far future.

Nevertheless, apart from the various uncertainties resulting from emission scenarios evaluated, model outputs used and natural year-to-year variability, study results must be taken with caution for two principal reasons. First, temperature indices can overestimate the potential impacts on viticulture. For instance, the BEDD index integrate both a minimum and maximum threshold in its equation, therefore accounting for the influence of high temperatures on vine performance and its photosynthetic activity. From the Table 5, results show that compared to the WI and HI index, the BEDD does not increase as strongly, especially under the RCP 8.5. Indeed, the HI and more importantly, the WI index, are uncapped viticultural indices. In the far future, heat stress may become an important factor defining grapevine behavior and impact models should consider this influence, which can cause a delay in grapevine phenology and grape ripening. And secondly, viticultural indices does not accurately describe grapevine behavior, the latter influenced by a complex interaction between physical, biological and human factors. These impact assessments studies should be completed by local vineyard studies, which should enhance the understanding of local climate variability, its influence on grapevine behavior as well as the dynamic nature of viticultural strategies and management practices.

TROISIÈME PARTIE

LA DIVERSITÉ ET LA COMPLEXITÉ DE L'ENVIRONNEMENT LOCAL ET DES PRATIQUES DE GESTION

Dans le contexte du changement climatique, la troisième partie s'articule autour de l'évaluation de la diversité et la complexité de l'environnement local et des pratiques de gestion. Elle est composée de trois chapitres, dont les deux premiers ont pour objectif d'étudier la variabilité spatiale du climat et du comportement de la vigne à échelle fine dans les vignobles. Pour cela, un dispositif de mesures climatiques et agronomiques a été mis en place dans deux sites d'études situés en Anjou-Saumur. Le dernier chapitre vise à étudier la vulnérabilité locale et la capacité d'adaptation des viticulteurs en se basant sur le vécu récent et leur vision du futur. Ce travail a été réalisé auprès des viticulteurs des deux sites d'études. Cette troisième partie présentera dans un premier temps les caractéristiques des deux sites d'études, et par la suite, décrira la méthodologie et les résultats des trois chapitres.

SOMMAIRE

		<i>Page</i>
Chapitre 5	Variabilité temporelle et spatiale du climat à l'échelle fine des terroirs viticoles	93
Chapitre 6	Impacts de la variabilité environnementale sur le comportement de la vigne à l'échelle fine des terroirs viticoles	107
Chapitre 7	Evaluation de la vulnérabilité locale et de la capacité d'adaptation des viticulteurs	119

AOP COTEAUX DU LAYON ET AOP SAUMUR CHAMPIGNY

Afin de considérer des conditions environnementales contrastées, mais aussi bien des cadres réglementaires et des pratiques différents, deux appellations d'origine protégée (AOP) en Anjou-Saumur ont été sélectionnées pour l'étude de cette troisième partie. Elles sont l'AOP Coteaux du Layon et l'AOP Saumur Champigny (Figure 41). Les principales caractéristiques de chaque appellation sont illustrées dans le Tableau 8.

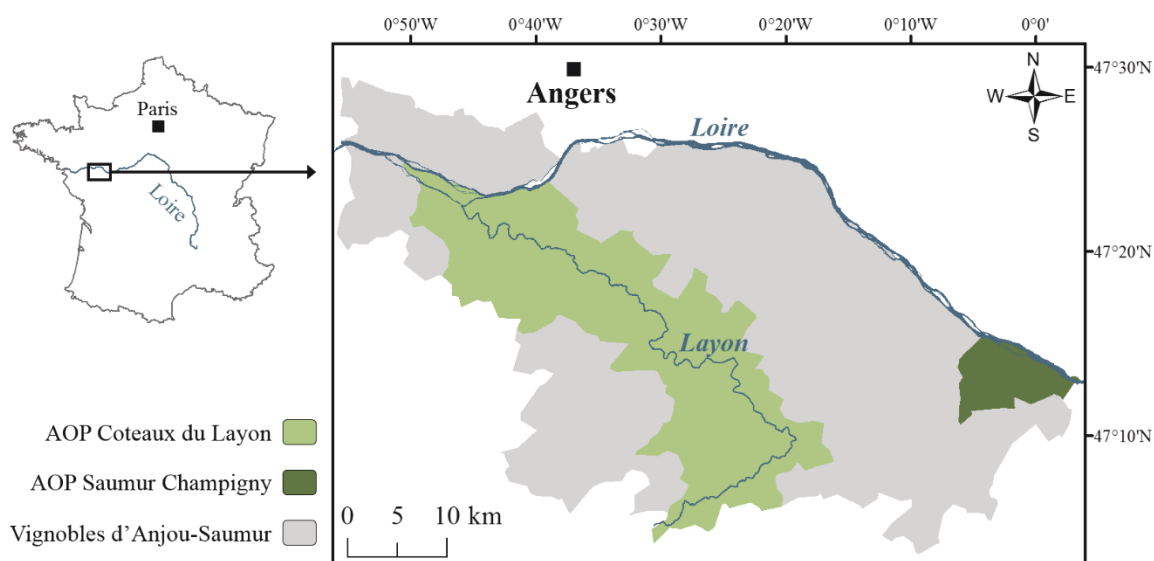


Figure 41 : Aire géographique de l'AOP Coteaux du Layon et de l'AOP Saumur Champigny, situées dans la sous-région viticole d'Anjou-Saumur, France

➤ AOP Coteaux du Layon

Etablie en 1950, cette appellation s'étend sur 27 communes, en suivant le cours du Layon, un affluent de la Loire d'une longueur de 70 kilomètres environ. Mais malgré cette aire géographique très étendue en Anjou-Saumur, son aire parcellaire est seulement délimitée sur environ 1500 ha. En effet, le vignoble des Coteaux du Layon est installé dans des situations topographiques et pédologiques spécifiques afin de favoriser la précocité de la vigne et d'assurer la production des vins liquoreux, issus d'un seul cépage autorisé, le Chenin. Bien que des vins liquoreux soient également produits dans d'autres vignobles septentrionaux (e.g. Alsace, Rheingau,...), la particularité des Coteaux du Layon est la réalisation de ce type de produit à partir d'un cépage moyennement tardif.

Par conséquent, en dehors des effets bénéfiques d'un climat zonal plus chaud et sec que l'ensemble du Val de Loire (*présentés dans la partie deux*), le contexte géomorphologique des Coteaux du Layon est une situation unique et très favorable au comportement de la vigne, en particulier, à la surmaturation des raisins (Cellier 1996). Reposant sur le socle

ancien du Massif Armoricain, le vignoble des Coteaux du Layon est structuré par la faille principale du Layon, qui guide le cours du Layon et qui a donné lieu à un relief asymétrique, avec la rive droite beaucoup plus accidentée que la rive gauche (Figure 44). Le vignoble est aujourd'hui installé sur deux coteaux de la vallée du Layon, où la rive gauche est composée de schistes du briovérien et la rive droite de sédiments ordoviciens qui ont été transformés en schistes et transpercés de roches volcaniques (i.e. rhyolites, spilites) (Fanet 2008). Néanmoins, c'est notamment cette rive droite qui est recherchée par les viticulteurs pour produire des vins de Coteaux du Layon. Ceci pour deux raisons : i) La rive droite a un dénivellement d'environ 80 m sur une courte distance, ce qui donne lieu à des fortes pentes, orientées vers le sud ; et, ii) l'altération des roches et l'érosion ont conduit à des sols peu épais (40 à 50 cm), caractérisés par des faibles réserves hydriques.

En début de la saison, ces facteurs contribuent de manière importante à la précocité du comportement de la vigne, ce qui permet un décalage du cycle végétatif et en particulier reproductif vers une période de l'année plus favorable (Chapitre 1, Encadré 1.6). Par ailleurs, situé près du Layon, le vignoble des Coteaux du Layon est souvent soumis à des brouillards matinaux en automne. Ainsi, cette conjonction entre la proximité du Layon et l'exposition au sud induit une alternance de périodes humides et sèches, ce qui est considéré comme un élément déterminant dans l'évolution de *Botrytis cinerea* en pourriture noble en période d'automne (Barbeau et al. 2001). L'humidité apportée par des brouillards matinaux stimule le développement du champignon, alors que le temps ensoleillé l'après-midi favorise l'évaporation de l'eau à travers la pellicule. Le Chenin, seul cépage autorisé pour la production des vins liquoreux et originaire de l'Anjou, est un cépage sensible au *Botrytis cinerea* (Barbeau et al. 2001). Lors de la récolte, les vendanges sont manuelles et se font par tries successives pour récolter les raisins atteints de pourriture noble ou passerillés (Figure 42).



Figure 42 : Photos des grappes de Chenin, prises dans l'AOP Coteaux du Layon, avec à gauche, les raisins passerillés, et à droite, les raisins botrytisés.

Comme cela est souvent le cas avec les appellations, les vins des Coteaux du Layon sont organisés dans une hiérarchie de plusieurs sous-appellations, où la qualité des vins et les cadres réglementaires de production augmentent avec les niveaux. Ainsi, pour le même cépage (i.e. Chenin), la classification hiérarchique dans l'ordre croissant de qualité est :

Coteaux du Layon générique, Coteaux du Layon Village, Premier Cru Chaume, Bonnezeaux et Grand Cru Quarts de Chaume.

➤ AOP Saumur Champigny

L'AOP Saumur Champigny a été créé en 1957 et couvre une superficie d'environ 1500 ha, où son aire géographique s'étend sur 8 communes. Comme pour le vignoble des Coteaux du Layon, Saumur Champigny est marqué par un contexte géomorphologique très contraste (Figure 44). D'une part, situé à proximité du Massif Armoricain, les vignes reposent sur un sol constitué de dépôts du turonien et du sénonien, qui sont caractéristiques des mers peu profondes (Fanet 2008). Dans ce contexte, ces formations sédimentaires du crétacé sont beaucoup plus sableuses et donc moins résistantes à l'érosion, ce qui explique la largeur de la Loire dans ce territoire. D'autre part, la morphologie de son paysage a été structurée par la faille de Montreuil-Bellay qui a soulevé l'aire géographique septentrionale du Saumurois dont fait partie l'AOP Saumur Champigny, en la basculant vers la Loire.

Ces deux entités géologiques offrent un paysage viticole constitué de plaines, de coteaux et de buttes, au voisinage de la Loire (Figure 43). L'ensemble des formations sédimentaires très variées (i.e. période crétacé en plaine et coteau, ou tertiaires sur le plateau) apportent une grande diversité de types de sols, qui sont généralement profonds, avec une réserve hydrique moyenne à forte. La proximité de la Loire a également un rôle clé sur le climat de Saumur Champigny. En effet, elle modère le climat zonal à tendance septentrionale, notamment lors des épisodes de gel au printemps, comme par exemple en 1991.



Figure 43 : Paysage des vignobles des Coteaux du Layon et de Saumur Champigny.

Enfin, selon le cahier des charges de cette appellation, trois cépages sont autorisés pour la production d'un vin rouge sec. Le principal est le Cabernet franc, un cépage probablement originaire du Sud-ouest de la France. Barbeau (2008) indique que « *il est vigoureux et moyennement fertile, de maturité de 2^{ème} époque, à grappes de taille moyenne et petites baies qui donnent des vins rouges aromatiques plus ou moins charpentés selon les terroirs* ». Lors de la récolte de Cabernet franc en Saumur Champigny, les vendanges sont effectuées à la machine ou manuelles, où la richesse minimale en sucre des raisins est fixée à 180 g/L et le rendement maximal à 57 hl/ha. Les deux autres cépages complémentaires, sont le Cabernet Sauvignon et le Pineau d'Aunis.

Tableau 8 : Principales caractéristiques environnementales et réglementaires de l'AOP Coteaux du Layon et de l'AOP Saumur Champigny.

Sites d'étude	AOP Coteaux du Layon	AOP Saumur Champigny
Surface	1500 ha	1500 ha
Roches	Métamorphique, volcanique	Sédimentaire
Propriétés des sols	Peu épais, moyenne à faible réserve hydrique	Profonds, réserve hydrique moyenne à forte
Propriétés du paysage	Relief accidenté, pentes moyennes à fortes	Présence de la Loire, pentes faibles à modérées
Cépages	Chenin	Cabernet franc et en complémentaires : Cabernet Sauvignon, Pineau d'Aunis
Richesse minimale en sucre des raisins	221 g/L	180 g/L
Rendement maximal autorisé	35 hl/ha	57 hl/ha
Style de vin	Vin blanc liquoreux	Vin rouge sec

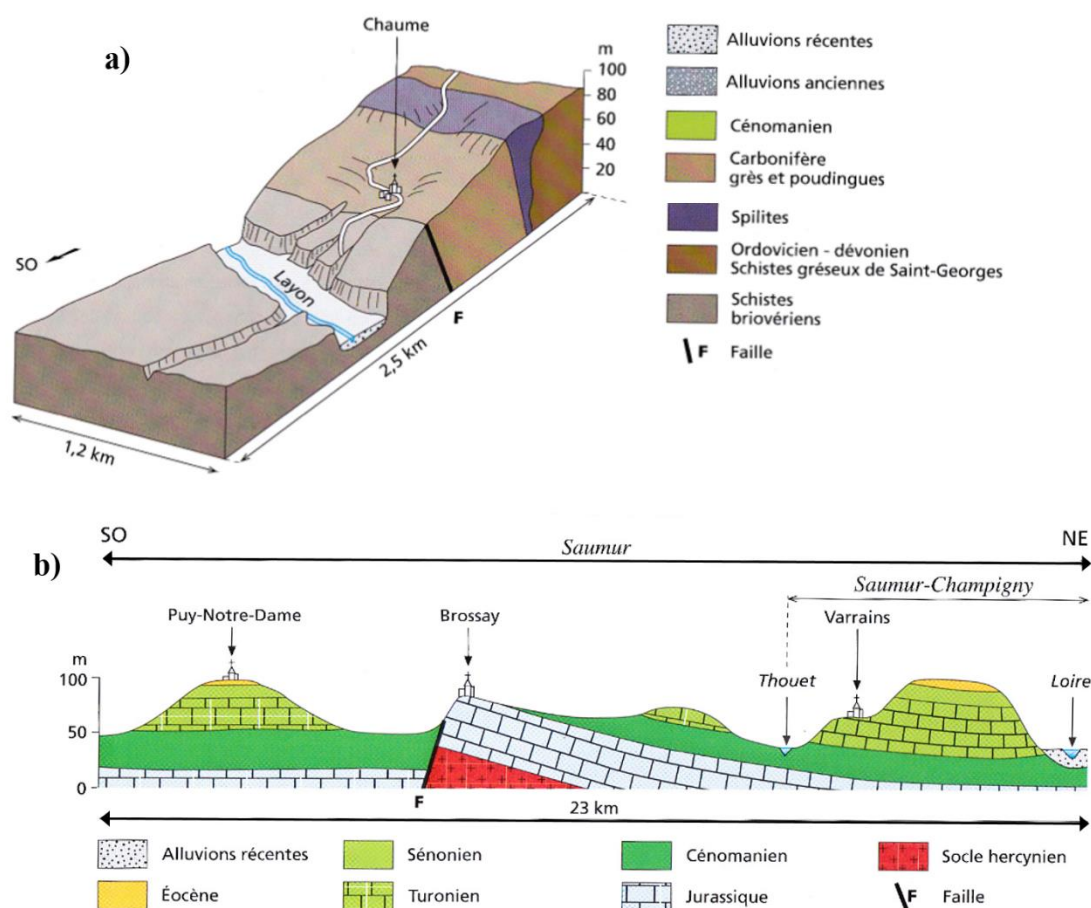


Figure 44 : Contexte géomorphologique de a) les Coteaux du Layon (exemple du coteau de Chaume), et b) le Saumurois, dont fait partie l'AOP Saumur Champigny (Fanet 2008).

CHAPITRE 5

Temporal and spatial climate variability at local vineyard scales

Abstract

In agricultural systems, and particularly in viticulture, temporal and spatial climate variations strongly influence crop growth and productivity. With a changing global climate, the viticulture sector faces many environmental and socio-economic challenges, to which winegrowers are required to adapt. In order to frame adaptation strategies and policies, at both individual and collective levels, many uncertainties arise, in particular how future climate changes will affect grapevine growth at local levels, where adjustments should occur. Aimed to enhance the conception of climate change adaptation in viticulture, this study undertakes a local assessment approach that specifically focuses on the temporal and spatial understanding of climate variability at vineyard scales. The methodological framework used in this study was applied to two regulated wine producing areas located in the Anjou-Saumur wine growing sub-region, France. For both study areas, a strong spatial variability in temperatures and viticultural indices was observed within the vineyards. This variability, related to local environmental features, was even more evident during extreme weather events, such as spring frosts. The study has highlighted the importance of undertaking local based studies at vineyard scales in order to better define the spatial variability in climate conditions and constraints. Within the context of climate change and the key issues surrounding adaptation, local assessments of climate variability should allow a greater understanding of the potential future impacts of climate change and adaptation strategies necessary at different spatial and temporal scales.

5.1. Study methodology

Four scales are commonly recognized in climate studies (i.e. macro, meso, local and micro), where each scale is distinguished by its spatial attributes (Oke 1987). This study focuses on two scales: i) Mesoclimate of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny, and ii) local climate of small geographical areas within each of these two wine appellations.

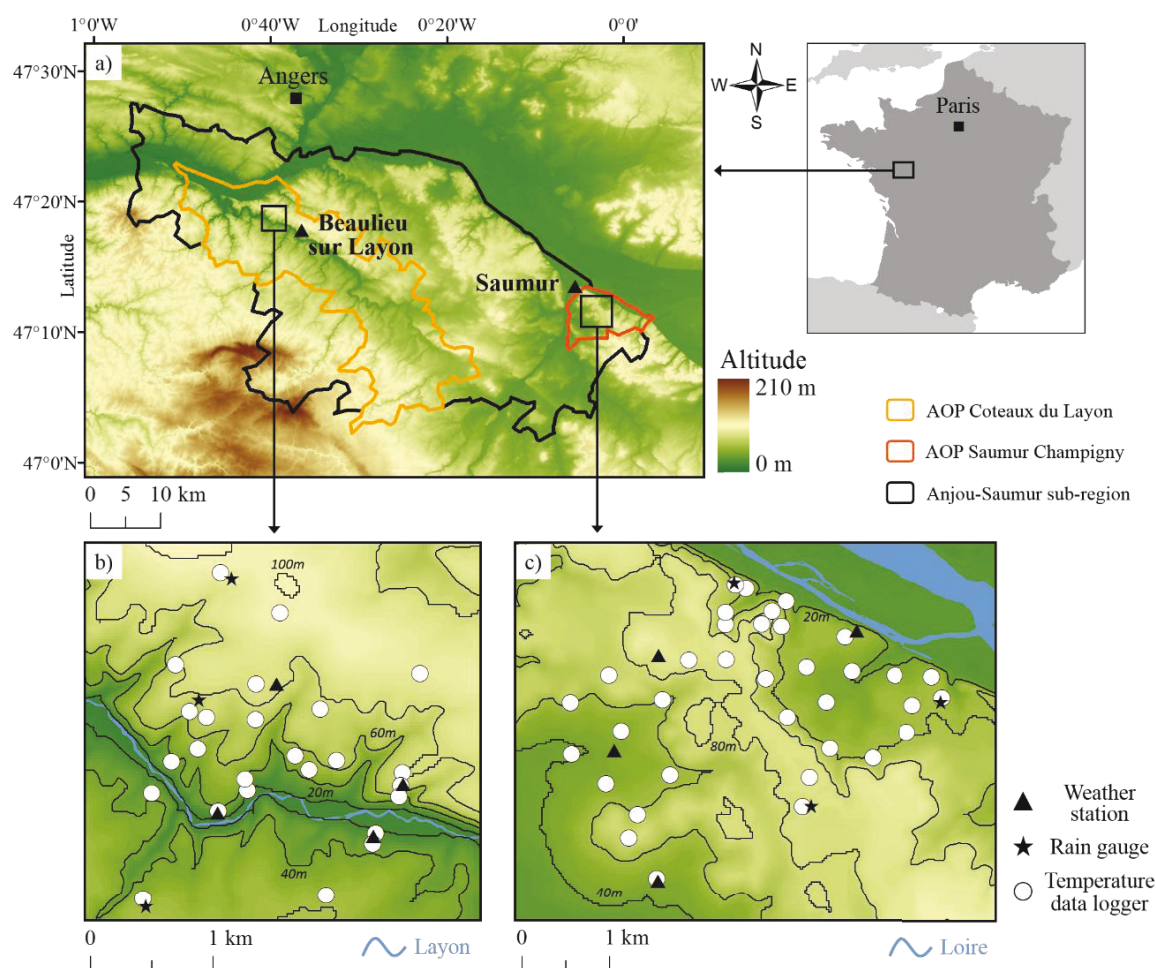


Figure 45: a) Geographical positions of the AOP Coteaux du Layon (indicated in orange) and AOP Saumur Champigny (indicated in red) in the Anjou-Saumur wine growing sub-region; and the experimental sites within b) AOP Coteaux du Layon and c) AOP Saumur Champigny.

5.1.1. Climate data

5.1.1.1. Mesoclimatic data

The mesoclimatic analysis was carried out by acquiring climate records from Beaulieu sur Layon and Saumur, two weather stations that are part of the regional network of Météo France, the national weather agency in France. The station in Beaulieu sur Layon was used to study the mesoclimate of the AOP Coteaux du Layon and the station in Saumur, the mesoclimate of the AOP Saumur Champigny (Figure 45a). With observations since 1988 in

Beaulieu sur Layon, daily minimum, maximum temperatures and rainfall totals were studied for both locations from 1988 to 2015 (Table 9). While a 30-year interval is more accurate (i.e. according to the World Meteorological Organization), climate normals were calculated on account of the 28-year historical record. The homogeneity of climate measurements were assured by Météo France.

Table 9: Geographical coordinates of the weather stations used in the mesoclimatic analysis of the AOP Coteaux du Layon and the AOP Saumur Champigny.

Study area	Weather Station	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Record used
COTEAUX DU LAYON	Beaulieu sur Layon	47°19'N	00°36'W	81 m	1988-2015
SAUMUR CHAMPIGNY	Saumur	47°15'N	00°04'W	69 m	1988-2015

Data source: Météo France

5.1.1.2. Local climatic data

The local climatic analysis was carried out by equipping two experimental sites within the AOP Coteaux du Layon and the AOP Saumur Champigny with a network of meteorological instruments (Figure 45b), which included³⁷:

- Automated weather stations (CR200X, Campbell Sci.), installed at 1.5 m above the soil surface in an open space and close to the vineyards in order to measure temperature, humidity, rainfall, wind speed and direction every hour.
- Temperature data loggers (Tinytag Talk 2, Gemini Data Loggers Ltd.), fixed in natural ventilated radiation shields (RS3, Onset HOBO) at 1 m above the soil surface and within the vineyard rows in order to record temperature readings every 15 minutes.
- Wired Rain Gauges (RAINEW 111, RainWise Inc.), placed at 1.5 m above the soil surface, allowing to measure hourly rainfall accumulations.

The study site in Coteaux du Layon had a surface area of about 900 ha (~3 km x 3 km), and in Saumur Champigny, a surface area of about 1600 ha (~4 km x 4 km). For this study, a 25m Digital Elevation Model (DEM) was used and digital soil characteristics (scale of 1:10 000) were obtained from the Cellule Terroir Viticole (CTV). Therefore, to cover the spatial diversity in local environmental features in each experimental site³⁸, four weather stations and three rain gauges were installed, along with 25 data loggers in Coteaux du Layon and 35 data loggers in the Saumur Champigny³⁹.

From 2013 to 2015, climate variables were recorded from 1 March to 30 September. In order to effectively use climate measurements, a data processing framework consisting of four steps was established. Recorded temperatures from data loggers were processed by:

- First identifying and removing outliers from each 15 minute measurement by employing a moving window. The latter had a specified range that was based on the median

³⁷ See Annex 2 for the images of climate instruments installed in each experimental site

³⁸ A preliminary study was undertaken in each study area before the installation of meteorological measurements (Annex 3 and 4).

³⁹ The environmental attributes of each instrument are presented in Annex 5 and 6

absolute deviation (MAD) of all measurements at the same time interval, as well as recordings taken 30 minutes before and after that interval. This moving window allowed to consider both the spatial and temporal nature in temperatures, which can be significant in a complex terrain. This study adopted a value of five times the MAD, although a value of three times the MAD is already considered as conservative (Leys et al. 2013).

- ii. After removing outliers, resulting for example from equipment failure, the next step was to replace missing data, which were processed in the following way: If only single data points were missing, they were filled by the average value of its neighboring values, whereas for larger data gaps, missing data were estimated by simple linear regression equations with neighboring data loggers ($R^2 > 0.95$). In 2013, two data loggers in Coteaux du Layon were removed from the analysis of that year due to large amounts of missing data; these data loggers were replaced from 2014.
- iii. In order to deal with any other measurement noises, the data was smoothed by averaging the 15 minute recordings over hourly intervals
- iv. Lastly, from the hourly datasets, daily minimum temperatures were estimated between 18 UTC day before and 6 UTC, while for daily maximum temperatures, from 6 UTC to 18 UTC. Daily average temperatures were estimated as the mean of observed minimum and maximum temperatures.

In 2015, 20 data loggers in each study area were replaced by automated data loggers (OrbiWise SA, Switzerland). During the first few months, the original data loggers were not removed in order to evaluate if the new data loggers could introduce measurement biases. No significant differences were detected between the original and new data loggers, mainly as the same temperature probes were used⁴⁰.

5.1.2. Climate analysis

In this study, the climate variables and viticultural indices presented in chapter 4 (Annex 1) were used. Still, the following modifications were made:

- Growing season average, minimum and maximum temperatures, as well as rainfall totals were calculated from April 1 to September 30,
- Growing Degree Days (GDD) was calculated from April 1 to September 30, based on the equation of the Winkler Index,
- Dryness Index was calculated for each location according to its soil water holding capacity as defined by the obtained digital soil data. The rainfall data used for each location were acquired from the nearest weather station or rain gauge.

It should be noted that the studied viticultural indices (e.g. Huglin Index, Dryness Index) were elaborated for regional climate studies, and may not be adapted for local based evaluations. Likewise, they are generally calculated over a 30-year climate record, attained from a weather station that comply with the specified norms of the World Meteorological Organization (e.g. flat land, open space, ventilated radiation shield, etc.). Nevertheless, by

40 See Annex 8 for evaluations

applying these indices at local vineyard scales, they enable a better understanding in the temporal and spatial range of climate conditions and constraints that are more specific to grapevine behavior (e.g. vine phenology, grape composition, etc.).

5.2. Results

5.2.1. Temporal and spatial variability in mesoclimatic conditions

From 1988 to 2015, the mean average temperature during the growing season was 17.0°C in Beaulieu sur Layon and 17.4°C in Saumur, while the mean total rainfall was 270.8 mm in Beaulieu sur Layon and 286.0 mm in Saumur. Accordingly, the AOP Saumur Champigny has a significantly warmer climate than the AOP Coteaux du Layon, but only in terms of average (+0.4°C) and minimum (+0.5°C) seasonal temperatures (Table 10). Indeed, no significant differences were observed for maximum temperatures or rainfall totals during the growing season. Based on the multicriteria climatic classification (MCC) system (Tonietto and Carbonneau 2004), both Beaulieu sur Layon and Saumur had a temperate and moderately dry climate, characterized by very cool nights during the ripening period.

Table 10: Characteristics of climate variables and viticultural indices calculated for the weather stations in Beaulieu sur Layon and Saumur from 1988 to 2015.

Variables and Indices	BEAULIEU SUR LAYON				SAUMUR				Difference	
	Normal ^a	2013	2014	2015	Normal ^a	2013	2014	2015	Bias ^b	t ^c
Growing season^d										
Tm (°C)	17.0	16.4	17.0	17.0	17.4	16.8	17.2	17.7	0.4	s
Tn (°C)	11.0	10.4	10.9	10.8	11.5	11.1	11.5	11.6	0.5	s
Tx (°C)	22.9	22.4	23.1	23.3	23.2	22.5	23.0	23.7	0.3	ns
P (mm)	271	342	337	337	286	351	349	345	15	ns
Viticultural indices										
GDD (°C units) ^d	1302	1221	1277	1294	1367	1280	1320	1406	65	s
HI (°C units)	1920	1824	1928	1951	1981	1867	1938	2051	61	ns
CI (°C)	11.1	11.3	11.9	9.5	11.4	11.6	12.2	10.1	0.5	ns
DI (mm)	40	43	69	72	47	61	83	79	7	ns

^aClimate normal is calculated from 1988 to 2015

^bDifference between the climate normals of Saumur and Beaulieu sur Layon

^ct: Significance value by Student's paired t-test; ns = non-significant ($P > 0.05$); s = significant ($P < 0.05$)

^dCalculated from 1 April to 30 September

5.2.2. Temporal and spatial variability in local climatic conditions

5.2.2.1. Growing season climate variables

During the growing seasons of 2013 to 2015 (i.e. period from April to September), an important spatial variability in temperatures was observed. First, between weather stations (i.e. four stations in each study area), average growing season temperatures varied by 0.4°C, 0.8°C and 0.4°C in Coteaux du Layon from 2013 to 2015 respectively, and in Saumur Champigny, by 0.6°C, 0.7°C and 0.5°C (Annex 9). These spatial variations are based on the difference between the lowest and highest growing season temperatures recorded each year. Secondly, between data loggers (i.e. 25 in Coteaux du Layon, 35 in Saumur Champigny), the spatial variability in growing season temperatures was likewise very strong (Table 11). From

2013 to 2015, average growing season temperatures varied by 0.7°C, 0.8°C and 0.6°C respectively in Coteaux du Layon, and by 0.7°C, 1.1°C and 1.1°C in Saumur Champigny. At the same time, minimum growing season temperatures varied by 1.5°C, 1.8°C and 1.8°C in Coteaux du Layon, and by 1.5°C, 1.7°C and 1.8°C in Saumur Champigny (Table 11). Whereas maximum growing season temperatures varied by 1.2°C, 1.1°C and 1.4°C in Coteaux du Layon, and by 1.0°C, 0.9°C and 1.0°C in Saumur Champigny. As for weather stations, this spatial variability in temperatures corresponds to the difference between the lowest and highest values for each growing season.

Table 11: Spatial variability in climate variables and bioclimatic indices, calculated from the network of data loggers in the experimental sites of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny.

Variables and Indices	2013				2014				2015			
	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a
COTEAUX DU LAYON												
<i>Growing season^{b, c}</i>												
Tm (°C)	16.4	0.2	16.0	16.7	16.9	0.2	16.4	17.2	17.1	0.2	16.7	17.3
Tmin (°C)	10.8	0.4	9.9	11.4	11.2	0.5	10.0	11.8	11.2	0.4	10.0	11.8
Tmax (°C)	21.9	0.3	21.5	22.7	22.5	0.3	22.0	23.1	22.9	0.3	22.4	23.8
P (mm)	291	12.7	277	310	325	17.7	291	342	332 ^d	8.7 ^d	327 ^d	342 ^d
<i>Viticultural indices</i>												
GDD ^b (°C units)	1218	32.7	1151	1280	1256	34.5	1181	1323	1298	36.2	1226	1353
HI (°C units)	1781	40.4	1729	1871	1861	36.3	1803	1936	1918	41.5	1849	2031
CI (°C)	11.3	0.7	9.7	12.1	11.6	0.7	10.0	12.5	9.8	0.5	8.3	10.5
DI (mm)	-111	36.7	-159	-28	-74	34.8	-125	7	-96	36.1	-145	-8
SAUMUR CHAMPIGNY												
<i>Growing season^{b, c}</i>												
Tm (°C)	16.7	0.2	16.3	17.0	17.1	0.2	16.5	17.6	17.6	0.2	16.9	18.0
Tmin (°C)	11.3	0.4	10.3	11.8	11.6	0.4	10.4	12.1	11.7	0.4	10.6	12.4
Tmax (°C)	22.2	0.2	21.7	22.7	22.7	0.2	22.2	23.1	23.4	0.3	22.9	23.9
P (mm)	364	23.4	331	402	381	29.2	342	407	324 ^d	8.6 ^d	317 ^d	334 ^d
<i>Viticultural indices</i>												
GDD ^b (°C units)	1273	34.9	1192	1324	1310	42.5	1195	1388	1391	44.1	1279	1477
HI (°C units)	1836	31.7	1752	1914	1907	35.0	1836	1977	2019	46.3	1942	2101
CI (°C)	11.8	0.6	10.3	12.6	11.8	0.8	9.4	12.8	10.0	0.5	8.7	10.9
DI (mm)	-22	32.3	-78	39	-6	32.7	-65	56	-41	32.7	-96	26

^aMean, standard deviation, minimum and maximum values obtained from the network of data loggers

^bCalculated from 1 April to 30 September

^cTm = average temperature, Tmin = minimum temperature, Tmax = maximum temperature, P = total rainfall

^dLack in complete data from all rain gauges and weather stations

In studying the influence of local landscape features on growing season temperatures (Figure 46), elevation was found to be the most significant factor explaining minimum growing season temperatures. Results show that the influence was more pronounced in Coteaux du Layon ($R^2=0.50$) than in Saumur Champigny ($R^2=30$), mainly because of the steep altitude increase in Coteaux du Layon that compared to Saumur Champigny. In Coteaux du Layon, there was a difference of ~1.2°C between highest (97m) and lowest altitude (25m),

and in Saumur Champigny, a difference of $\sim 1^{\circ}\text{C}$ between highest (88m) and lowest altitude (40m).

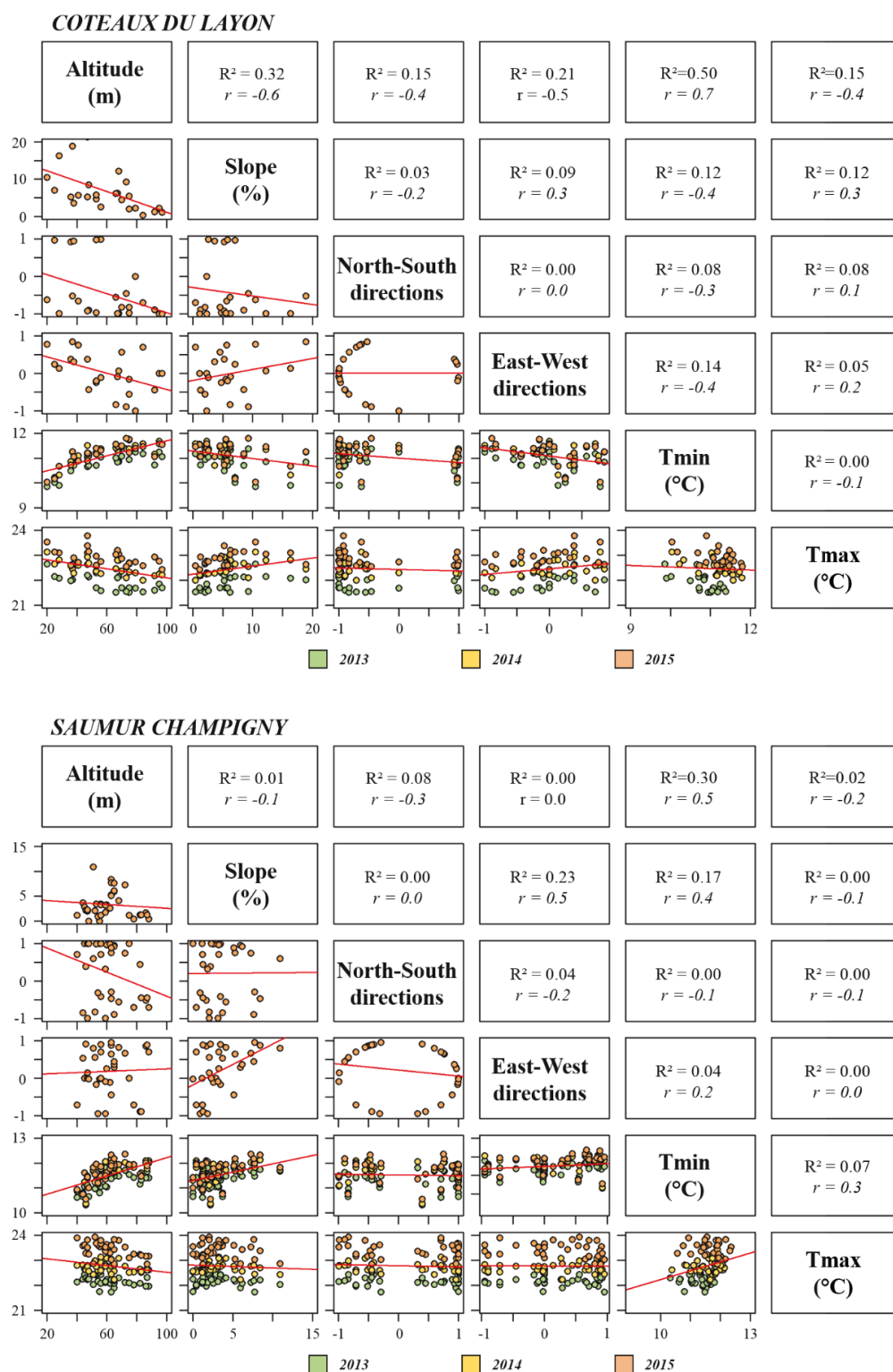


Figure 46: Matrix scatterplot illustrating the linear relationships between growing season minimum (Tmin) and maximum (Tmax) temperatures of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny as a function of altitude (m), slope (%), North-South (cosine component) and East-West (sine component) direction. The corresponding coefficient of determination, R^2 , and Pearson correlation coefficient, r , for each linear model are also shown.

Maximum growing season temperatures were more complex. Compared to nocturnal cooling and the dominant influence of elevation, daily temperatures are affected by many local environmental factors (e.g. slope inclination, orientation, vegetative obstacles, etc.) that modify the amount of direct or diffuse solar radiation received at a given site. Table 12 indicate the influence of increasing the number of explanatory environmental features on observed growing season temperatures. In this context, factors such as landscape openness, terrain obstacles, or factors related to soil properties should be integrated in order to improve the understanding of the spatial variability in seasonal and daily temperatures.

Table 12: Multiple linear regressions between observed minimum and maximum growing season temperatures from 2013 to 2015 and local environmental features.

Local Environmental features	COTEAUX DU LAYON		SAUMUR CHAMPIGNY	
	R ²	P-value	R ²	P-value
Growing season minimum temperatures				
Alt.	0.50	<0.001	0.30	<0.001
Alt. x Slope	0.51	<0.001	0.51	<0.001
Alt. x Slope x North-South	0.51	<0.001	0.52	<0.001
Altitude x Slope x North-South x East-West	0.51	<0.001	0.52	<0.001
Growing season maximum temperatures				
Alt.	0.15	0.001	0.02	0.12
Alt. x Slope	0.17	0.001	0.03	0.23
Alt. x Slope x North-South	0.21	0.001	0.04	0.24
Altitude x Slope x North-South x East-West	0.21	0.001	0.04	0.38

Alt. = Altitude (m), Slope (%), North-South = North-South directions, East-West = East-West directions

In order to quantify more precisely the spatial variability in growing season temperatures between data loggers in both study areas, the Figure 47 show the values of the median and the interquartile range.

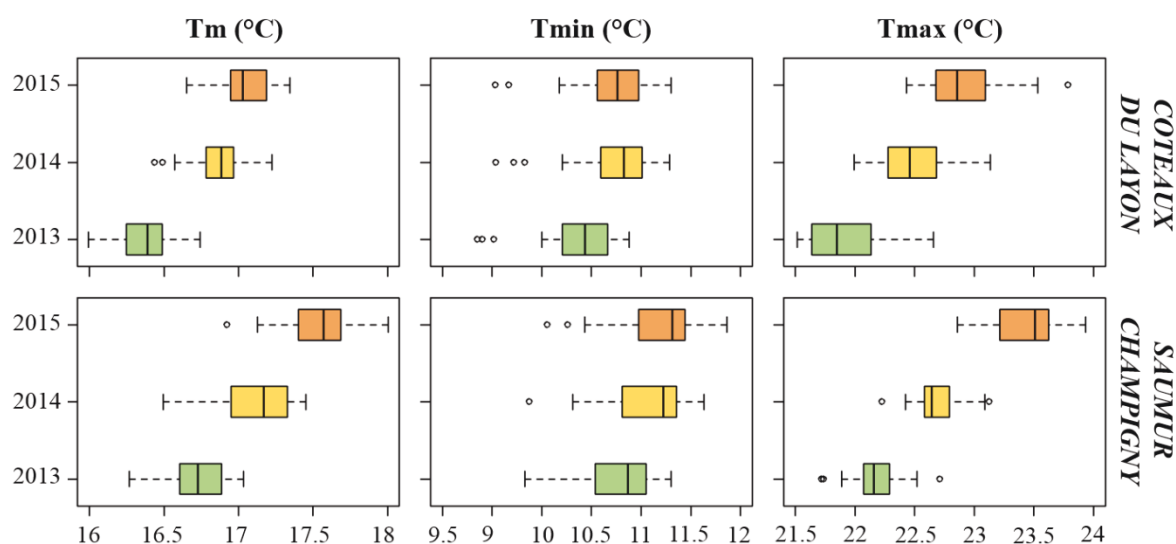


Figure 47: Box plots representing the temporal and spatial variability in average (Tm), minimum (Tmin) and maximum (Tmax) growing season temperatures for the data acquired from data loggers in Coteaux du Layon and Saumur Champigny, from 2013 to 2015.

By considering the differences between the 25th and 75th percentiles, average growing season temperatures in Coteaux du Layon varied by 0.3°C, 0.2°C and 0.3°C from 2013 to 2015, and by 0.3°C, 0.4°C and 0.3°C in Saumur Champigny. While temperature measurement instruments are not similar at local and mesoclimatic scales, nor the surrounding conditions (e.g. open space vs vineyard environment), study results show that the spatial variability in growing season temperatures are comparable to the variability at mesoclimatic scales (Table 10). In this context, Bonnefoy et al. (2012) have shown that the spatial variability in seasonal temperatures at local scales can be as significant as the seasonal temperature variability at larger scales. These results have also been supported by the ANR-TERVICLIM and GICC-TERADCLIM projects, which conducted fine-scale climate studies in many winegrowing regions worldwide (Quénol 2014). Study results show that each experimental site represent well the mesoclimatic differences in temperatures between Coteaux du Layon and Saumur Champigny. Indeed, regardless of the year, the majority of data loggers in Saumur Champigny always record higher seasonal temperatures than the data loggers in Coteaux du Layon (Figure 47). Yet, within each study site, according to the diversity and complexity in environmental features, there is a strong variability in temperatures.

5.2.2.2. Viticultural indices

For both study areas, the strong spatial variability in growing season temperatures was reflected on the spatial variability in calculated viticultural indices (Table 11, Figure 48). For these indices, differences were first related to the geographical position of each study area. The experimental site of Saumur Champigny had a higher Huglin Index, and therefore has a warmer climate than Coteaux du Layon. While rainfall totals did not vary significantly between the two study sites (Table 10), Coteaux du Layon had a drier climate as defined by the Dryness Index. The latter is indeed related to the vineyards of Coteaux du Layon having shallow soils, with low water holding capacities.

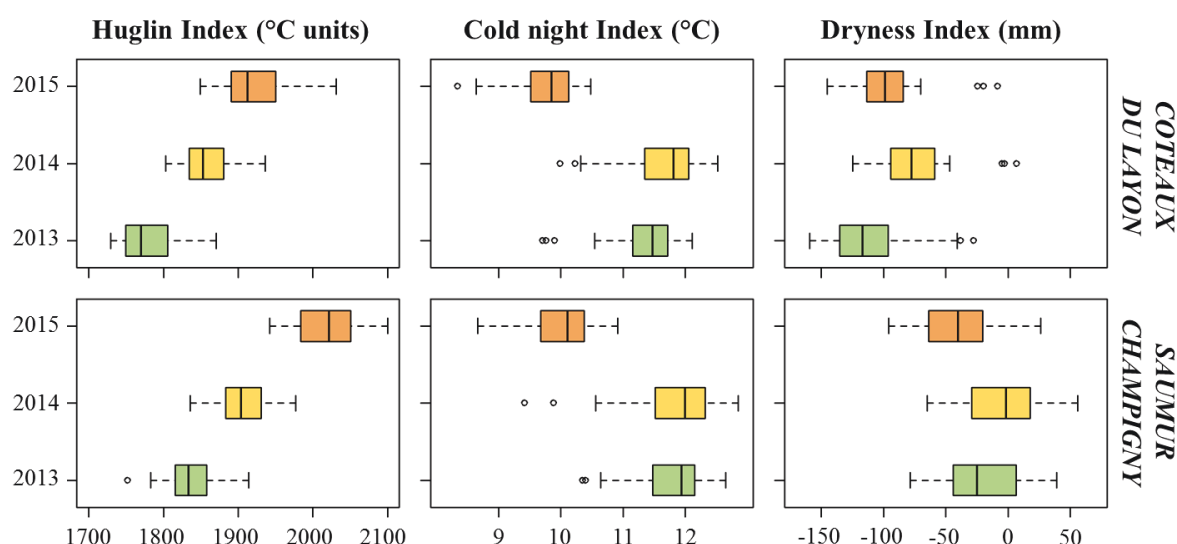


Figure 48: Box plots representing the temporal and spatial variability in the Huglin Index, Cold night Index and Dryness Index for the data acquired from data loggers in Coteaux du Layon and Saumur Champigny, from 2013 to 2015.

Yet, as with seasonal temperatures, it emerges that these indices vary significantly among the vineyard plots of each study area according to the characteristics of local environment. From 2013 to 2015, the Huglin Index varied by 141°C units, 133°C units and 182°C units in Coteaux du Layon, and in Saumur Champigny, by 162°C units, 141°C units and 158°C units. At the same time, the Dryness Index varied by 132 mm, 132 mm and 137 mm in Coteaux du Layon, and in Saumur Champigny, by 117 mm, 121 mm and 122 mm (Table 11).

The spatial variability in these viticultural indices is expected to have important influences on grapevine growth, grape productivity and composition. To understand the effect that these viticultural indices and their variability may have on grapevine behavior, the phenological stages of flowering and veraison for Chenin (i.e. white grapevine variety of Coteaux du Layon) and for Cabernet franc (i.e. red grapevine variety of Saumur Champigny) were modeled (Table 13). These two phenological stages were assessed by calculating their heat requirements according to the Grapevine Flowering Veraison model (Parker et al. 2013). Results show that for flowering, differences of ~3 days for Chenin and ~5 days for Cabernet franc can be expected, whereas for veraison, ~7 days for Chenin and ~9 days for Cabernet franc. However, in order to understand the extent of these differences in viticultural indices on viticulture, complementary studies on grapevine behavior should be undertaken in each study area.

Table 13: Spatial variability in modeled flowering and veraison dates (Day of year, DOY) in the experimental sites of the AOP Coteaux du Layon (for Chenin) and AOP Saumur Champigny (for Cabernet franc). Data were obtained from the data loggers in each study area.

Grapevine Phenology ^a	2013				2014				2015			
	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a
COTEAUX DU LAYON												
<i>Chenin</i>												
Flowering	175	1	174	177	163	1	160	164	161	1	160	163
Veraison	245	2	242	248	238	2	233	241	232	2	230	236
SAUMUR CHAMPIGNY												
<i>Cabernet franc</i>												
Flowering	170	1	169	172	159	1	156	162	157	1	155	161
Veraison	241	2	238	245	232	2	228	239	227	2	223	233

^aCalculated according to the Grapevine Flowering Veraison model (Parker et al. 2013)

^bMean, standard deviation, minimum and maximum values obtained from the network of data loggers

5.2.2.3. Extreme temperature events

During extreme temperature events such as risk of spring frosts or heat waves, an even greater spatial variability in minimum and maximum temperatures was observed. During the study period from 2013 to 2015, two key extreme weather events were evaluated.

First, an important radiative spring frost occurred on April 29, 2013. During this event, minimum temperatures varied from -1.2°C to +2.8°C (difference of 4.0°C) in Coteaux du Layon (Figure 49), and from -2.0°C to +2.6°C (difference of 4.6°C) in Saumur Champigny (Figure 50). During this type of nocturnal cooling, the spatial disparity in minimum temperatures is strongly related to the local topography. Indeed, as energy is lost through radiation upward from the soil surface at night, the colder air, denser and heavier than the

warmer air, flows from higher to lower elevations due to gravity (Quénol et al. 2004; Poling 2008). The accumulation of cold air at the low-lying areas increases the risk of frost, while temperatures remain warmer at higher elevations (Figure 49b). Accordingly, during the spring frost risk of April 29, minimum temperatures in Coteaux du Layon were principally influenced by altitude ($R^2 = 0.86$), resulting in the lowest minimum temperatures recorded at low elevations. Other explanatory factors were the east-west slope orientation ($R^2 = 0.41$) and slope inclination ($R^2 = 0.38$).

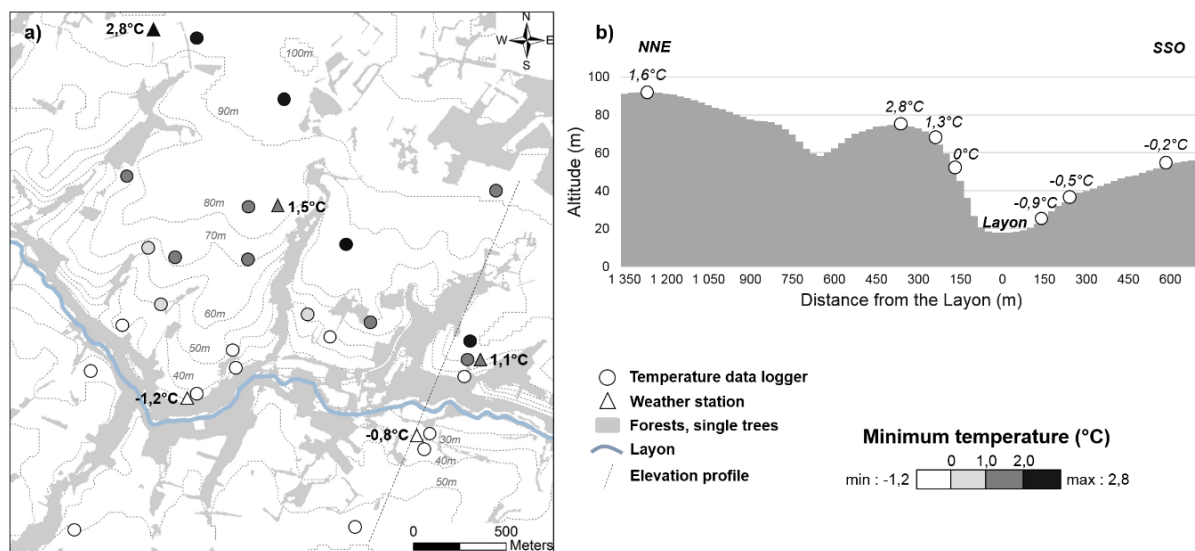


Figure 49: a) Spatial variability in minimum temperatures on 29 April 2013 in the experimental site of the AOP Coteaux du Layon, and b) according to an elevation profile of NNE to SSO.

In the experimental site of Saumur Champigny, the influence of topographical factors on the spatial variability of minimum temperature was more complex (Figure 50a). While altitude affected minimum temperatures in Saumur Champigny ($R^2=0.21$), the proximity of the river Loire played an important role in moderating minimum vineyard temperatures ($R^2=0.25$). Vineyards situated close to the Loire River recorded warmer minimum temperatures than vineyards located further away, at same altitude levels (Figure 50b). The lowest minimum temperatures were therefore recorded in vineyards on flat plains, located further from the river Loire.

Following this spring frost event, agronomic observations helped to highlight a very close relationship between the recorded minimum temperatures, the intensity of the spring frost (duration of $T_{min} < 0^\circ\text{C}$) and the percentage of observed vine damages (i.e. on buds). In Saumur Champigny, the most damaged vineyards plots were located in the low-lying areas, further away from the river Loire (more than 50% damages). In these areas, the duration of nocturnal cooling was about 4h (i.e. $< 0^\circ\text{C}$). The damage in Coteaux du Layon was less important with only three vineyard plots showing damages between 20 and 40%. While the intensity of the radiative spring frost was more important in Saumur Champigny, the differences are also related to where vineyards are planted. In the Coteaux du Layon, the low-lying and therefore the coldest areas are generally not cultivated while in Saumur Champigny, many vineyards are planted in the flat plains where the risks of spring frosts are

very high. To that end, wind machines and small oil burners have been installed in these low laying vineyard areas.

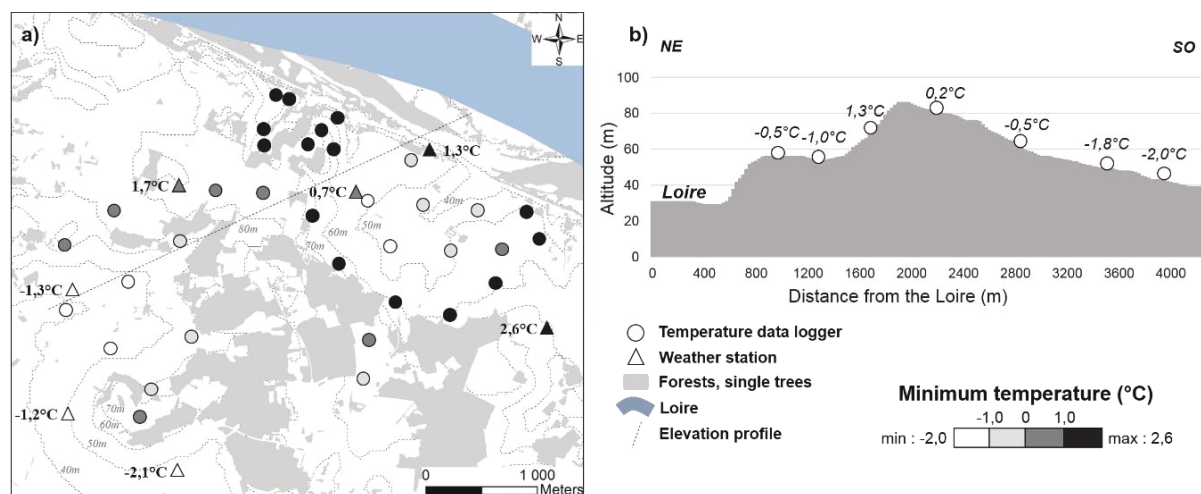


Figure 50: a) Spatial variability in minimum temperatures on 29 April 2013 in the experimental site of the AOP Saumur Champigny, and b) according to an elevation profile of NE to SO.

And lastly, the spatial variability in maximum temperatures was studied on July 22, 2013, after several warm days ($>30^{\circ}\text{C}$) and nights ($>18^{\circ}\text{C}$) led to a general heat wave over the study areas. During this event, maximum temperatures varied from 35.5°C to 37.7°C (difference of 2.2°C) in Coteaux du Layon, and from 35.3°C to 38.8°C (difference of 3.5°C) in Saumur Champigny. The influence of local environmental factors on maximum temperatures was also more complex, as with growing season maximum temperatures. In general, maximum temperatures were positively correlated with slope steepness in Coteaux du Layon, whereas maximum temperatures in Saumur Champigny were more related to landscape openness, calculated using the IFP index (Jacquet and Morlat 1997). Consequently the warmest maximum temperatures were observed in vineyards characterized by a sheltered landscape, minimizing airflow and increasing ambient air temperature.

CONCLUSION

It has been illustrated that climate, and in particular temperature, has a central role in grapevine growth and grape ripening. Among the various processes influenced by temperature thresholds are grapevine photosynthesis and respiration, while vine phenology is mainly driven by temperature or heat accumulation over time. It is because of these strong relations between climate and grapevine behavior that current and expected climate changes present many environmental and socio-economic challenges to viticulture. In response to climate change, and given the perennial nature of grapevines, the viticultural sector is increasingly required to formulate adaptation strategies. To that end, climate models are used to evaluate potential future impacts and as a result, inform adaptation practices and policies. While climate modeling techniques have significantly improved over the last decade (e.g climate projections at high resolutions), their outputs remain largely uncertain at the scale where

adaptation matters the most, that is, the vineyard scale. In this context, this study conducted a meso and local climatic analysis in two regulated wine producing areas in the Anjou-Saumur wine growing sub-region, France. Using a network of meteorological instruments, this study sought to enhance the understanding of the temporal and spatial variability of climate at vineyard scales. Study results have revealed a strong spatial variability in climate variables and viticultural indices within the two study areas. In agreement with Bonnefoy et al. (2012), study results have shown that the spatial variability in growing season temperatures at local scales can be as significant as the variability at larger scales. These results suggest that the spatial heterogeneity in local climate conditions should represent an important buffer in response to future climate changes, allowing winegrowing to manage the rapid changes expected in wine quality and typicity. In the near and medium future, or according to the outcomes of the low and intermediate emission scenarios (RCP 2.6 and 4.5), this spatial heterogeneity should further permit winegrowers to maintain current cultivated grapevine varieties and remain within the traditional boundaries of wine producing areas. In order to provide winegrowers with tools to optimize adaptation strategies, the next step is to apply modeling techniques that elaborate spatial maps of climate conditions (e.g. growing season temperatures) and constraints (e.g. spring frost areas). With uncertainty surrounding future climate outcomes, an initial step towards adapting to climate change can start by already spatially optimizing viticultural strategies and management practices. In this context, Bonnefoy (2013) presented a stepwise multiple linear regression model, which has been validated in the vineyards of the Coteaux du Layon. Recently, within the vineyards of Saint-Emilion (Bordeaux), this work has been improved by Le Roux et al. (2016), who investigated the nonlinear response of near-surface temperatures to local environmental features. Indeed, using these statistical modeling techniques should provide a greater understanding of the key exposures leading to local climate vulnerability and how adaptation strategies can address them effectively.

CHAPITRE 6

Impacts of climate variability on grapevine behavior at local vineyard scales

Abstract

Climate change poses several challenges for the wine-industry in the 21st century. Adaptation of viticultural and winemaking practices are therefore essential to preserve wine quality and typicity. Given the complex interactions between physical, biological and human factors at local vineyard scales, studies conducted at these fine scales allow to better define the local environment and its influences on grapevine growth and berry ripening. Accordingly, they lead to a greater understanding of the potential future impacts of climate change and adaptation strategies necessary at different spatial and temporal scales. Within the context of climate change, this study presents the impacts of the local climate variability on grapevine behavior in two regulated wine producing areas located in the Anjou-Saumur wine growing sub-region, namely in the AOP Coteaux du Layon (variety: Chenin) and the AOP Saumur Champigny (variety: Cabernet franc). Both areas were equipped with climatic instruments and during the growing season, phenological observations and berry composition analyses were effectuated. A strong spatial variability in vine performance was observed for both study areas. Overall, the local climate variability as defined by viticultural indices was related to grapevine phenology and grape composition. Vineyard plots with greater heat accumulation had earlier phenological stages and higher maturity indices. As adaptation to climate change is essential, these results show that it is necessary to conduct studies at vineyard levels scales in order to better understand the spatial variability of the local climate and its influences on grapevine behavior.

6.1. Study methodology

Conducted in the two experimental sites of the AOP Coteaux du Layon and the AOP Saumur Champigny, this study is a continuation of the mesoclimatic and local climatic analysis undertaken in chapter 5. In order to assess the temporal and spatial impacts of climate variability on grapevine behavior, 12 vineyard plots were selected in each study area in order to employ methods designed to assess grapevine phenology and grape composition. These selected vineyard plots are in accordance with the network of temperature data loggers (Figure 51).

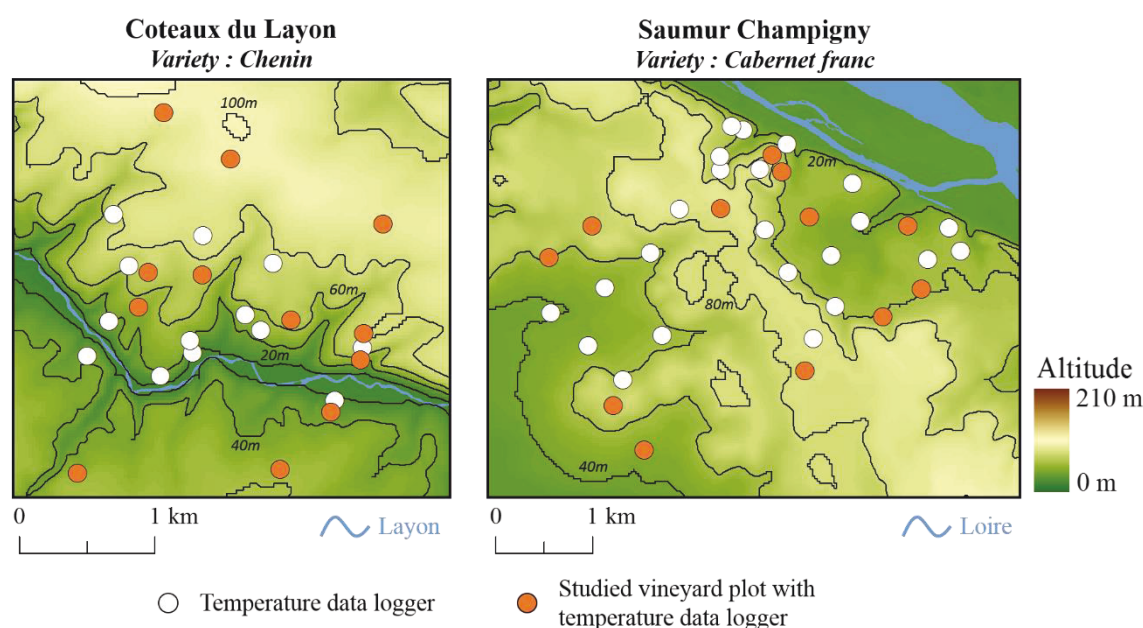


Figure 51: Position of the studied vineyard plots in the two experimental sites of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny. Each plot is equipped with a temperature data logger. *See Figure 45 for the geographical location of the two study areas.*

6.1.1. Viticultural observations

The 12 selected vineyard plots in the AOP Coteaux du Layon are planted with Chenin, the only variety allowed for the production of sweet white wines in this appellation. Whereas in the AOP Saumur Champigny, the study was carried out on 12 Cabernet franc plots, the principal variety grown in this wine appellation and used for the production of dry red wines.

The studied vineyard plots cover a range of environmental conditions (i.e. topographical, pedological) that are representative of each study area. As described in the Chapter 5, a 25m Digital Elevation Model (DEM) was used and digital soil characteristics (scale of 1:10 000) were obtained from the Cellule Terroir Viticole (CTV). These fine scale soil data contain information on physical soil properties (e.g. soil texture, depth, etc.) as well as estimated soil variables such soil water holding capacities (Morlat 2001). Studied vineyard plots also varied in terms of vineyard management practices (e.g. inter-row soil management techniques) and production strategies (e.g. conventional, integrated or organic farming). At the beginning of this study, the selected plots in the AOP Coteaux du Layon had planting ages between 7 and

23 years, and in Saumur Champigny between 13 and 40 years, which were considered to be in full productive capacity (Annex 7).

The viticultural observations were carried out near the position of the temperature data logger. For each plot, 30 healthy vines of the same growth were selected and partitioned over 5 adjacent rows of 6 consecutive vines, where the third or middle row was equipped with the data logger. During the course of the study (2013-2015), the experimental design in each vineyard plot was maintained, except in the case of grapevine trunk diseases that cause the decline and death of vines (e.g. Esca).

6.1.1.1. **Phenological data**

The phenological data are based on the visual observations of flowering and veraison. Within the framework of the PERPHECLIM project (de Cortazar-Atauri et al. 2015), these two key phenological stages were evaluated according to the BBCH scale (Lorenz et al. 1995; Bloesch and Viret 2008). For an individual vine, the flowering stage (i.e. BBCH 65) was considered reached when 50% of the flowers were open. A flower was considered as open when the base of the cap was detached, even if the cap has not fallen yet (Destrac-Irvine et al. 2016). With observations carried out twice per week, the flowering date of each vineyard plot was determined by averaging all the observations of the 30 individual vines and defining the date (i.e. day of year, DOY) when 50% of the vines has reached flowering.

The veraison stage (i.e. BBCH 81) had a similar protocol. Veraison is the growth stage that mark the onset of ripening, and is generally characterized by a softening and color change in the berry skin. For Chenin, white variety, veraison was measured by a touch perception, while for Cabernet franc, red variety, it was by visual color perception. While the softening of berry skins may occur prior to the change in color (Castellarin et al. 2015) and thus introduce an observation bias about the correct timing of veraison, visual color perception, especially for red grape varieties, has been found to be more accurate than touch perception.

6.1.1.2. **Grape composition data**

A week after the onset of the mean date of veraison for all vineyard plots (i.e. Coteaux du Layon and Saumur Champigny), berry sampling was performed every 7 to 10 days until harvest. Sampling was carried out on the same day for each plot, where 200 berries were sampled randomly from the 30 individual vines. After grinding the berries, the sample juice was used to measure: soluble sugar content (g/L), total acidity (g/L), concentration in tartaric and malic acid (g/L), pH and the estimated weight of 1000 berries (g).

From these measurements at regular intervals, the day of the year (DOY) when sugar concentrations of 170 g/L were reached was determined for each plot (i.e. by simple linear regression). The sugar level of 170 g/L was selected since some vineyard plots did not always acquire a sugar content of more than 180 g/L at harvest (e.g. in 2013). This estimated point during the ripening period was used to determine the differences in earliness between plots as a complementary information on grapevine phenology.

Besides these analyses on berry components, two measurements were undertaken prior to harvest in order to provide information on the water and nitrogen status of the vineyard plots.

To that end, 100 additional berries were sampled and used to measure the carbon isotopic ratio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio, expressed in ‰) and the available nitrogen content (mg/L). The carbon isotope ratio permits to assess the level of vine water stress, particularly for the latter stages of the growing season (Van Leeuwen et al. 2009). The greater the water stress, the higher the proportion of carbon 13 (^{13}C) in the berries. The values vary between -20‰ and -27‰, where -20‰ indicate a high water stress and -27‰, an absence of water stress.

6.2. Results

In order to understand principal characteristics of grapevine phenology and grape composition during each growing season (2013-2015) at the level of and within each study area, the study referred to the climate data and analysis presented in Chapter 5.

6.2.1. Growing season climate variability

The mean climate characteristics in Beaulieu sur Layon and Saumur Champigny for each growing season included in this study (2013-2015) are illustrated in Table 10. In 2013, the growing season was cooler than normal conditions, while 2014 was comparable with the mean average temperatures. The growing season of 2015 was warmer than normal conditions in Saumur, while in Beaulieu sur Layon, it was similar. All three growing seasons had higher than normal rainfall totals (i.e. about +65 mm). However, the monthly distribution of average temperatures and rainfall totals varied strongly between 2013 and 2015 (Figure 52).

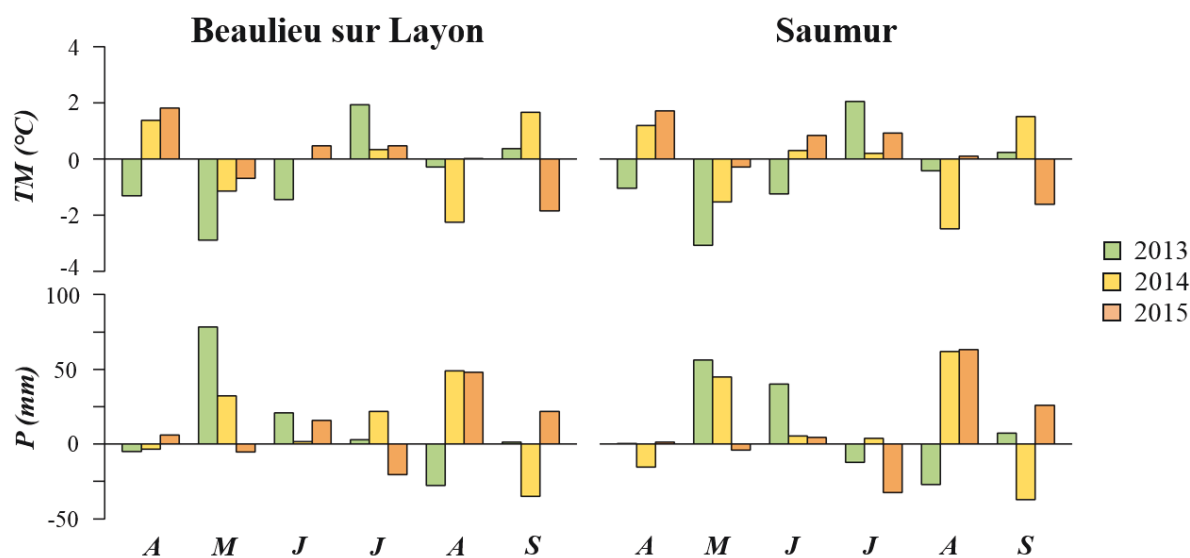


Figure 52: Relative to the period from 1988 to 2015, the monthly average temperature and total rainfall anomalies from April to September in Beaulieu sur Layon and Saumur.

Relative to mean conditions from 1988 to 2015, the growing season of 2013 was cool in April, very cool and wet in May (~35% of total growing season rainfall), cool and wet in June, warm in July and wet in August, followed by normal conditions in September. As presented in Chapter 5, 2013 was also marked by an important spring frost event on April 29. The growing season of 2014 was warm in April, cool and wet in May, wet in August, and

warm and particularly dry in September. And lastly, the growing season of 2015 was warm in April, slightly cooler/warmer or wetter/drier from May to July, wet in August and followed by a cool and wet period in September. This late rainfall in 2015 meant that almost 50% of total rainfall from April to September occurred during the later stages of the growing season. Still, rainfall mostly occurred in the form of heavy rainfall. For example in Saumur, the number of days with heavy rainfall (>10mm) from April to September was 14 days in 2015, compared to the 30-year normal of 7 days.

6.2.2. Variability in grapevine phenology

According to the phenological observations (Table 14), the occurrence of flowering was the earliest in 2015 (08/06 in Saumur Champigny, 13/06 in Coteaux du Layon), followed by 2014 (10/06 in Saumur Champigny, 15/06 in Coteaux du Layon) and the latest in 2013 (29/06 in Saumur Champigny, 02/07 in Coteaux du Layon). Veraison also took place similarly, earliest in 2015 (16/08 in both areas), proceeded by 2014 (22/08 in Saumur Champigny, 21/08 in Coteaux du Layon) and latest in 2013 (01/09 in Saumur Champigny, 02/09 in Saumur Champigny).

Table 14: Observed dates (day of year, DOY) for flowering and veraison, as well as the estimated day of year when sugar contents of 170 g/L were attained in studied vineyard plots. In the AOP Coteaux du Layon, the variety is Chenin and in the AOP Saumur Champigny, it is Cabernet franc.

Grapevine growth stages	COTEAUX DU LAYON				SAUMUR CHAMPIGNY			
	Mean ^a	Std.	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std.	Min ^a	Max ^a
Flowering								
2013	183	1	181	185	180	1	179	182
2014	166	1	164	168	161	1	160	165
2015	164	2	161	166	159	1	157	161
Veraison								
2013	245	2	241	247	244	2	242	248
2014	233	2	230	236	234	3	231	239
2015	228	3	223	231	228	4	223	234
Sugar content (170 g/L)								
2013	272	8	259	284	273	6	264	282
2014	258	6	251	275	258	4	252	266
2015	253	6	247	267	252	4	247	258

^aMean, standard deviation, minimum and maximum values obtained from the network of vineyard plots

Still, for each growing season, the timing of flowering and veraison varied strongly between the studied vineyard plots. In the AOP Coteaux du Layon, the occurrence of flowering varied by 4 days in 2013, by 4 days in 2014 and by 5 days in 2015. While in the AOP Saumur Champigny, it ranged by 3 days, 5 days and 4 days from 2013 to 2015. The observations in veraison displayed greater dissimilarities. In the AOP Coteaux du Layon, the timing of veraison varied by 6 days in 2013, by 6 days in 2014 and by 8 days in 2015, and in the AOP Saumur Champigny, by 6 days, 8 days and 11 days from 2013 to 2015.

Considering the day of the year when sugar contents of 170 g/L were reached, the differences between vineyard plots were very important (Table 14). They ranged between 20 to 25 days for the AOP Coteaux du Layon and between 11 to 18 days for the AOP Saumur

Champigny, depending on the growing season. A strong spatial variability in grapevine phenology was therefore observed within each study area. For example in the Coteaux du Layon, the implications of these difference meant that during ripening, some vineyard plots were in the stage of normal ripening, whereas others plots have already reached the stage of over-ripening, either through the process of “passerillage” (on-vine grape drying) or noble rot (botrytised grapes).

In studying the influence of climate, soil and cultivar on grapevine performance, Van Leeuwen et al. (2004) showed that growing season climate conditions and in particular, heat accumulation were the principal driver in the seasonal rhythm of grapevine phenology. The Figure 53 illustrate differences in the rate of heat accumulation for the three studied growing seasons. Results demonstrate that heat accumulation took place at a faster rate in 2015, resulting in higher heat amounts from April 1 to September 30 (Table 10), which therefore explains the earlier occurrence in flowering and veraison of about 3 weeks than compared with 2013.

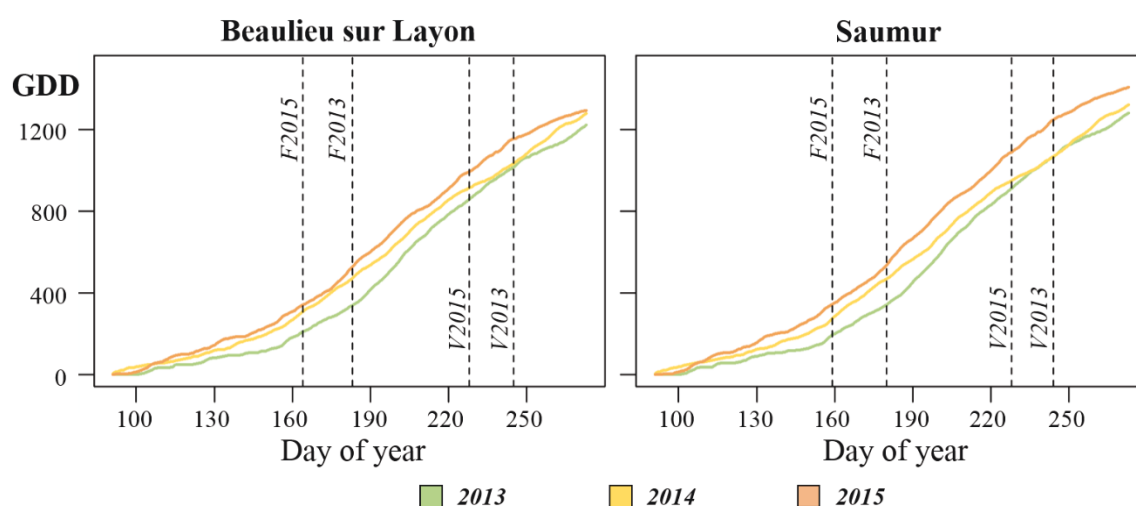


Figure 53: Accumulation of Growing Degree Days (GDD, °C units) from April 1 to September 30, with a base temperature of 10°C (Winkler et al. 1974). The mean dates of Flowering (F) and Veraison (V) for the Coteaux du Layon (Chenin) and Saumur Champigny (Cabernet franc) in 2013 and 2015 are also indicated.

Regardless of the year, the Figure 53 illustrate that flowering and veraison (examples of 2013 and 2015) took place when a certain threshold in heat accumulation was reached (for flowering ~300 GDD and for veraison ~1000 GDD). In Chapter 5, the expected occurrence in flowering and veraison dates were predicted according to the GFV model (Parker et al (2013)). The Figure 54 show the comparison between the observed and predicted dates in flowering and veraison for Chenin in Coteaux du Layon and for Cabernet franc in Saumur Champigny from 2013 to 2015.

While there are disagreements between the observations and predictions (e.g. for flowering, RMSE = 5 days for Chenin and 6 days for Cabernet franc), results show that heat accumulation is a decisive factor of grapevine phenology. The weaker relationship for veraison was expected, as grapevine behavior during the latter stages of the growing season is

strongly influenced by soil water conditions (Barbeau et al. 2003). To that end, dry soil conditions may generate the extra “heat” required for veraison to take place.

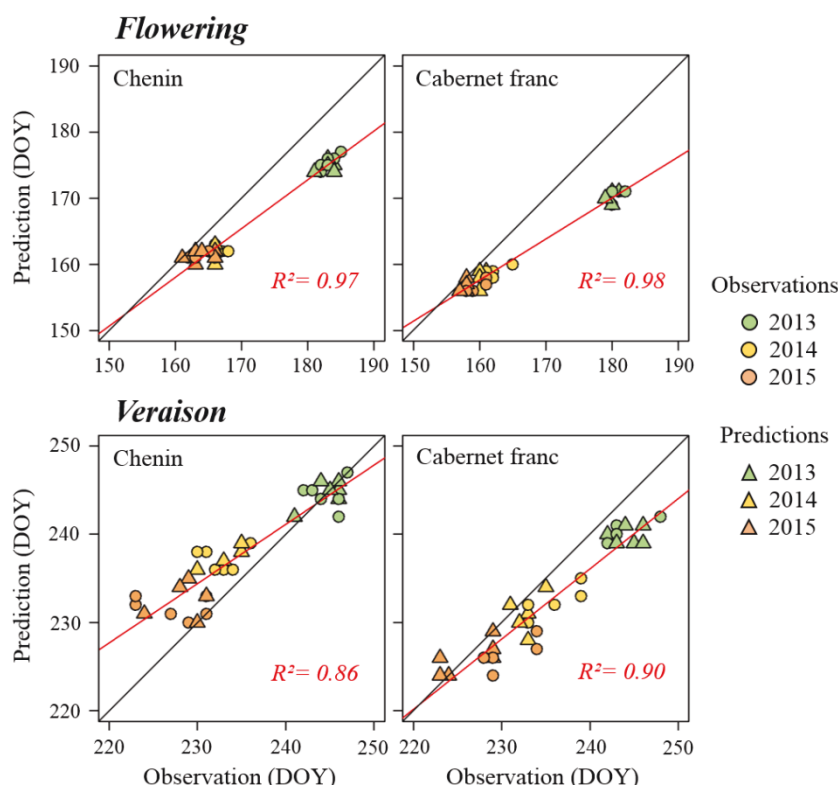


Figure 54: Linear relationships between observed and predicted dates in flowering and veraison for Chenin in the AOP Coteaux du Layon and for Cabernet franc in Saumur Champigny. The predicted dates were modeled according to the Grapevine Flowering Veraison model (Parker et al. 2013).

6.2.3. Variability in grape composition

The measured berry composition prior to harvest is illustrated in Table 15 for the three consecutive growing seasons from 2013 to 2015.

At 5 weeks post-veraison, the sugar content varied by 70 g/L, 53 g/L and 52 g/L for Chenin in Coteaux du Layon, and by 30.3 g/L, 29 g/L and 18 g/L for Cabernet franc in Saumur Champigny from 2013 to 2015. The strong differences in Coteaux du Layon are indeed related to over ripening processes (e.g. effect of noble rotting by *Botrytis cinerea*), where rapid increase in sugar concentrations results from the evaporative loss of water (Jackson 2008). Accordingly, as certain vineyard plots reach the over ripening stage, the contrast in sugar concentrations become stronger.

Total acidity, which was much related to the concentration in malic acid ($R^2=0.69$ in Coteaux du Layon and $R^2=0.70$ in Saumur Champigny), varied by 1.6 g/L, 2.8 g/L and 2.2 g/L for Chenin in Coteaux du Layon, and by 1.0 g/L, 1.0 g/L and 1.6 g/L for Cabernet franc in Saumur Champigny. The growing season of 2015 indicated the lowest concentrations in total acidity. Accordingly, the maturity index, which is the ratio of sugar content to total acidity, varied by 17.5, 28.0 and 19.3 for Chenin from 2013 to 2015, and by 6.9, 10.4 and 17.9 for

Cabernet franc. The important dissimilarities between studied vineyard plots for other measured berry components (e.g. malic acid, berry weight) are shown in the Table 15.

Table 15: Differences in berry composition five weeks post-veraison for Chenin in the AOP Coteaux du Layon and Cabernet franc in the AOP Saumur Champigny.

Grapevine Composition	COTEAUX DU LAYON				SAUMUR CHAMPIGNY			
	Mean ^a	Std.	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std.	Min ^a	Max ^a
Sugar (g/L)								
2013	189.9	20.3	151.0	221.0	192.6	7.7	180.1	210.4
2014	208.3	15.0	180.0	233.0	201.8	9.6	187.0	216.0
2015	205.2	13.2	175.0	227.0	206.3	5.5	198.0	216.0
Total acidity (g/L)								
2013	6.4	0.5	5.7	7.2	5.5	0.3	5.0	5.9
2014	5.9	0.8	4.4	7.2	5.5	0.3	5.0	6.0
2015	5.9	0.7	4.6	6.8	4.5	0.4	3.7	5.3
Tartaric acid (g/L)								
2013	6.5	0.7	5.4	7.2	6.5	0.7	4.8	7.2
2014	4.6	0.3	4.3	5.3	5.5	0.3	4.9	6.2
2015	6.2	0.5	5.4	7.1	5.8	0.5	5.1	6.6
Malic acid (g/L)								
2013	4.9	1.1	3.6	6.8	3.2	0.4	2.5	3.7
2014	4.9	1.1	3.3	6.8	3.3	0.4	2.3	3.9
2015	4.5	1.1	2.8	6.4	2.5	0.5	1.9	3.5
Maturity Index (g/L)								
2013	30.0	4.9	21.3	38.8	35.1	2.3	32.5	39.4
2014	36.4	7.5	25.0	53.0	36.7	3.1	32.8	43.2
2015	35.3	4.8	25.7	45.0	46.1	5.0	38.3	56.2
Berry weight (g)								
2013	1506	320	1128	2079	1412	139	1254	1727
2014	1683	191	1334	1927	1413	138	1201	1618
2015	1438	353	921	2047	1340	91	1189	1468
Carbon isotopic ratio (‰)								
2013	-23.5	2.1	-26.7	-20.4	-25.2	1.0	-26.1	-22.9
2014	-27.5	0.9	-28.7	-25.3	-27.5	0.8	-28.6	-26.1
2015	-26.4	1.1	-28.0	-24.5	-26.4	0.7	-27.3	-24.8
Nitrogen content (mg/L)								
2013	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	114.7	30.9	78.0	164.0	142.1	24.0	102.0	182.0

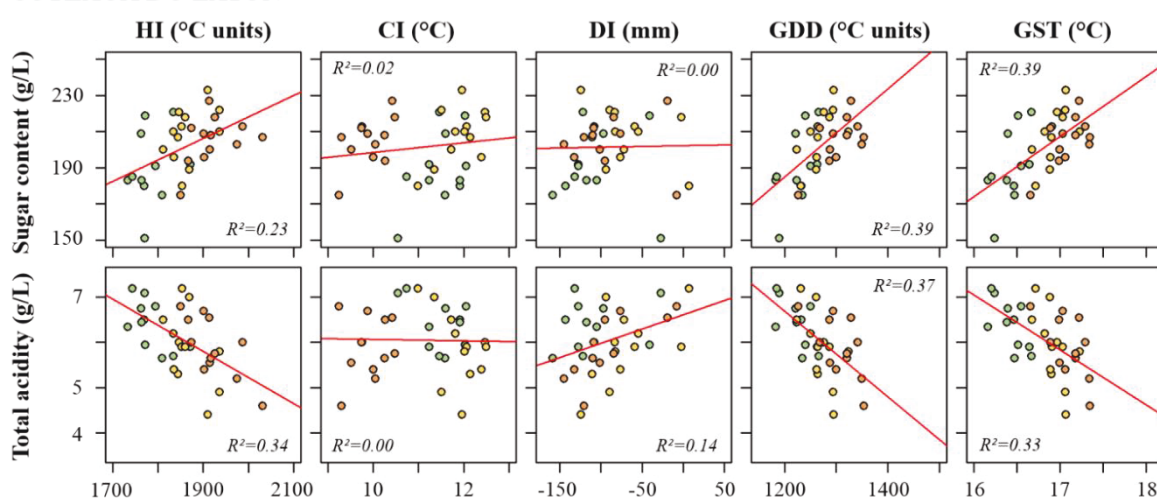
^aMean, standard deviation, minimum and maximum values obtained from the network of vineyard plots

In order to understand the impact of climate conditions on grape composition, the linear relations between two measured berry components (i.e. sugar content and total acidity) and various viticultural indices were studied. The results for the Chenin in the AOP Coteaux du Layon and for Cabernet franc in Saumur Champigny are presented in Figure 55.

For both experimental sites, results illustrate that climate influenced the content in soluble sugars (g/L) and total acidity (g/L). The strongest relationships were observed with the calculated temperature-based indices of Growing Degree Days (GDD, °C units) and Growing Season average Temperatures (GST, °C). In this context, vineyard plots with greater heat accumulation were characterized by higher levels in soluble sugars, while having lower concentrations in total acidity. Similar results were observed for the relationship between Huglin Index values and the respective concentrations in sugars and total acidity. Indeed, warmer growing season temperatures allow the vine to function more frequently at optimum

temperature thresholds for vine photosynthesis and hence favour the accumulation of sugars in grape berries. Whereas the metabolism of total acidity, and more importantly malic acid, is greatly affected by temperature fluctuations, where elevated temperatures enhances the respiration of malic acid during berry ripening. As respiration takes place during the day as the night, night temperatures are likewise key factors influencing total acidity levels. Considering therefore the influence of night temperatures during ripening on total acidity via the Cold night Index (CI, °C), expected results were observed in Saumur Champigny ($R^2=0.40$), meaning that cooler night time temperatures lead to higher concentrations in total acidity. While, no influence was observed in Coteaux du Layon ($R^2 = 0.00$), the removal of the growing season of 2015 (i.e. *indicated in light red*) from the observations lead to the Cold night Index being well correlated to the concentrations in total acidity ($R^2 = 0.27$, $p < 0.05$).

COTEAUX DU LAYON



SAUMUR CHAMPIGNY

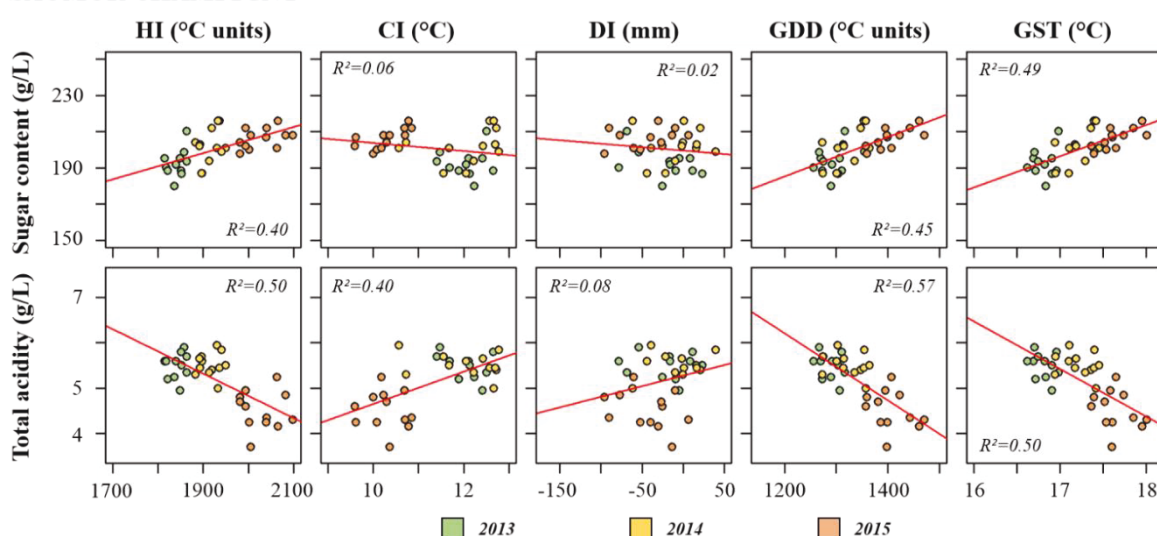


Figure 55: Linear relationships between the sugar content (g/L) and total acidity (g/L) five weeks post-veraison and the values of the Huglin Index (HI, °C units), Cold night Index (CI, °C), Dryness Index (DI, mm), Growing Degree Days index (GDD, °C units) and Growing season average temperature (GST, °C) from 2013 to 2015 for the AOP Coteaux du Layon and AOP Cabernet franc. The corresponding coefficient of determination, R^2 , for each linear model is shown.

Comparing the Coteaux du Layon with Saumur Champigny, climate x berry composition interactions were always weaker for Chenin in Coteaux du Layon. A possible reason may be that because Chenin in Coteaux du Layon at five weeks post-veraison is already in the process of over ripening, the changes in sugar and acidity contents were in addition to climate conditions, likewise being affected by the actions of *Botrytis cinerea*. Barbeau et al (2001) explained that when *Botrytis cinerea* develops on grape berries, it results in a significant increase in the sugar content accompanied by a decrease in acidity.

While the Dryness Index (DI, mm), which estimate the amount of soil water available at the end of the growing season, illustrated no significant relations with sugar and acidity contents, the measured carbon isotope ratios for Chenin in Coteaux du Layon was well correlated with the Dryness Index ($R^2 = 0.47$). Yet, no significant relationship was observed for Cabernet franc in Saumur Champigny. This result is mainly because of the subsoil formation in each study area, as generally, Cabernet franc is expected to be more sensitive to soil water availability than Chenin (Gaudillère et al. 2002). The vineyards of Cabernet franc are situated on a calcareous subsoil, which has a “buffer” effect during dry conditions and ensures a regular soil water supply. For Cabernet franc, the absence of a coherent relationship between the DI and the level of vine water stress (i.e. based on the carbon isotope ratio) is therefore due to the moderating role of the calcareous soils.

CONCLUSION

The local climate analysis in the previous chapter has shown a strong spatial variability in viticultural indices, which were related to local environmental features such as altitude, slope inclination and orientation. The results from that chapter suggested that within the context of climate change, the variations in local climate conditions should provide winegrowers with adaptation options that : i) should moderate the potential impacts of future climate changes, and ii) allow winegrowers to maintain current cultivated grapevine varieties within the traditional boundaries of their wine appellations.

In order to understand the extent of these differences in viticultural indices on viticulture, this chapter studied the impacts of climate variability on grapevine behavior. The studied viticultural observations of grapevine phenology and grape composition have likewise demonstrated a strong spatial variability in vine performance. Through the use of simple statistical analyses, significant correlations were observed between grapevine behavior and the values of the viticultural indices presented in Chapter 5. For instance, vineyard plots with warmer growing season temperatures were characterized by higher levels of soluble sugars and lower concentrations in total acidity. While viticultural indices were elaborated for regional studies, where climate data are obtained over long periods and from normalized weather stations, the findings from this study have shown that they can provide important information about grapevine behavior at local vineyard levels. Study findings therefore support the results in Chapter 5 that spatial variations in local climate conditions will provide important adaptation solutions for winegrowers. Still, viticultural indices have shortcomings. Results have shown that berry components such as sugar and acidity concentrations are only

partly described by the values of the various indices. Complementary analyses are therefore required to look at possible modifications that can be brought to these indices, making them more adapted or appropriate to be used at local vineyard levels. For example, the Cold night Index can be modified by considering the frequency in temperature ranges, rather than a simple calculation of the average minimum temperature during the ripening period. On the other hand, as study results have shown these indices to be related to local environmental features, calculation modifications should also include the integration of these features. For example, in chapter 5, the dryness index was modified in order to integrate plot level soil characteristics. In comparing the estimated dryness index with the measured carbon isotope ratios in Chenin berries, significant results were obtained. These modifications, i.e. through further statistical analysis or by the integration of local factors, should provide viticultural indices more adapted at local vineyard scales, which in the context of climate change adaptation will enhance the understanding on spatial variability in climate conditions and grapevine behavior.

However, viticulture remain a complex system, which include the interactions between physical, biological as well as viticultural activities. While climate influences were observed in this study, a significant part of the differences in grapevine performance is much likely to be associated with viticultural practices. As mentioned in the study methodology, winegrowers' decision making was not controlled and throughout the three growing seasons studied, management practices varied greatly in response to annual climate conditions. Complementary studies should therefore be undertaken in order to: i) identify the role of those viticultural practices on annual grapevine behavior, and ii) to understand the temporal and spatial nature of viticultural decision making. Indeed, the expected impacts of climate change on viticulture will greatly depend on how winegrowers' are adapting or will be adapting to climate variability and change.

CHAPITRE 7

Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive processes

Abstract

Adaptation to climate change is a major challenge facing the viticulture sector. Temporally, adaptation strategies and policies have to address potential impacts in both the short- and long-term, whereas spatially, place-based and context-specific adaptations are essential. To help inform decision-making on climate change adaptation, this study adopted a bottom-up approach to assess local climate vulnerability and winegrowers' adaptive processes in two regulated wine producing areas in the Anjou-Saumur wine growing sub-region. France. The data used for this study was collected through individual semi-structured interviews with thirty winegrowers. With a focus on wine quality, climate-related exposure and sensitivity were dependent on many contextual factors (e.g. northern geographical position, wine regulatory frameworks, local environmental features) interacting with the regional oceanic climate. Climate and other non-climate related variables brought about important changes in winegrowers' management practices, varying in time and space. This on-going process in decision-making enhanced winegrowers' adaptive responses, which were primarily reactive (e.g. harvesting, winemaking) or anticipatory (e.g. canopy and soil management) to short-term climate conditions. Winegrowers described changing trends in climate- and grapevine-related variables, with the latter attributed to regional climate changes and evolving management practices. Regarding future climate trends, winegrowers' displayed great uncertainty, placing the most urgent adaptation priority on short-term strategies, while changing grapevine varieties and using irrigation were identified as last resort strategies. The study concluded by discussing the implications of these findings in the context of climate change adaptation in viticulture.

7.1. Study methodology

In order to take into account contrasting environmental conditions, management practices and regulatory frameworks, this study was conducted in the two wine producing appellations of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny (Table 16).

Table 16: Primary environmental and regulatory characteristics for the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny.

Study areas	Surface (ha)	Rock formation	Soil properties	Landscape features	Grapevine variety	Wine style
<i>AOP Coteaux du Layon</i>	1500	Metamorphic and volcanic	Shallow slate soil	Steep to moderate slopes	Chenin	Sweet white wine
<i>AOP Saumur Champigny</i>	1500	Sedimentary	Deep calcareous soil	Flat plains and moderate slopes	Cabernet Franc	Dry red wine

7.1.1. Participating winegrowers

Thirty winegrowers (i.e. producers of both grapes and wines) participated in this study. From each study area, fifteen winegrowers were selected according to their seniority, geographical position, farm size and whether the companies were family owned or privately held. Farm sizes varied from 6 to 55 ha for Coteaux du Layon and from 12 to 48 ha for Saumur Champigny, whereas for differences in production strategies, there were 4 conventional, 7 integrated and 4 organic farms from Coteaux du Layon and 5 conventional, 7 integrated and 3 organic farms from Saumur Champigny. Among the winegrowers selected from Saumur Champigny, five were also members of the regional cellar cooperative. In terms of their geographical position, the winegrowers selected from Saumur Champigny represented all 9 villages of this wine producing appellation. For the study area in Coteaux du Layon, winegrowers were mainly selected from the 6 villages that characterize the communal Coteaux du Layon appellation. This selection criterion gave the opportunity to interview winegrowers who produce both generic Coteaux du Layon and higher quality wines with more strict production regulations within the appellation hierarchy.

7.1.2. Semi-structured interviews

The study conducted individual semi-structured interviews with the selected winegrowers. This research technique consists of many open-ended questions (e.g. “what”, “how”), with the objective of collecting and understanding participants’ experiences and opinions on a particular event or topic (Rubin and Rubin 2005). While open-ended questions are prepared beforehand, some may arise naturally during the interview. Semi-structured interviews are efficient, resourceful (i.e. detailed information concerning complex questions) and flexible, as the interviewer can explain or rephrase any difficult or misunderstood questions. Semi-structured interviews are nevertheless time consuming, where the quality of the data collected strongly depends on the skill of the interviewer and the trust inspired in participants. Prior to fieldwork, pre-test interviews were completed with two additional winegrowers to ensure that the questionnaire met research goals. Thereafter, individual interviews were conducted at participants’ wine farms, firstly in 2012 with winegrowers from Coteaux du Layon, and secondly in 2013 with winegrowers from Saumur Champigny. Each interview lasted about an

hour and a half, recorded with the participant's consent and carried out by the same interviewer.

The questionnaire developed had a framework of four themes. The first theme focused on general wine farm information (e.g. grapevine varieties, wine styles). The second theme focused on changing viticultural practices over recent decades. Winegrowers were asked to describe how annual (e.g. pruning techniques; vigor, disease and pest control; soil, yield and harvest management) and perennial practices (e.g. varietal material; site selection; planting system) have evolved at farm- and plot-level, including identifying the possible causal factors for those changes. The third theme focused on climate-related perceptions and experiences over the last 20 years. Our interest in climate was therefore not revealed until here. Winegrowers were asked to identify the favorable and unfavorable climate conditions for grapevine behavior and wine production. In addition, they were asked to describe their adaptive responses to those conditions, which according to Smit and Skinner (2002) vary depending on their timing (i.e. reactive or anticipatory) and duration (i.e. tactical/short-term or strategic/long-term). The final theme focused on winegrowers' perceptions of climate change. Winegrowers were asked to comment on recent climate changes and their impacts on grapevine behavior and wine production. From here, they were asked about future climate changes, its potential impact and their view on necessary adaptation strategies. Using a list of viticultural practices defined beforehand, winegrowers had to organize them in an ascending order, from urgent to low adaptation priority, according to a temporal scale, ranging from short to long term over the 21st century.

7.1.3. Qualitative content analysis

Winegrowers' interviews were analyzed through qualitative content analysis (Graneheim and Lundman 2004). Hsieh and Shannon (2005) defined qualitative content analysis as “a research method for the subjective interpretation of the content of text data through the systematic classification process of coding and identifying themes or patterns”. Qualitative content analysis focuses on interpreting or making sense of rather than quantifying the content of data. This research method involves a process of preparation (e.g. transcribing interviews), analysis (e.g. coding, categorizing) and reporting (Graneheim and Lundman 2004; Elo and Kyngäs 2008). Each interview recorded was transcribed verbatim and the transcribed texts were then read through several times to obtain an overall understanding of the raw qualitative data. Following the preparation phase, an inductive approach was used to analyze the data obtained from the open-ended questions (Elo and Kyngäs 2008). The whole analysis process is not linear but instead iterative, meaning that there is repeated movement back and forth between raw data, codes, categories and themes to ensure that all aspects of the content are described and identified (i.e. trends, similarities and differences). Based on the recurrent and emergent patterns and themes obtained from winegrowers' responses, study findings were identified and described. As with semi-structured interviews, qualitative content analysis is time-consuming and results are more susceptible to selective or biased interpretation.

7.1.4. Climate variability

To understand the characteristics of past climate conditions, the study referred to climate data obtained from Beaulieu sur Layon and Saumur (Figure 45a). Closely located to each study area, they provide information on various temperature and rainfall variables, which are presented in Table 10. In Beaulieu sur Layon, the mean average temperature and total rainfall during the growing season (April to September) was 17.0°C and 270.8 mm and in Saumur Champigny, 17.4°C and 286.0 mm. Historical climate records in Beaulieu sur Layon and Saumur illustrate a strong climate variability from 1988 to 2012 (Figure 56). For both locations, the warmest season was in 2003, the coolest in 1988 and 1993, and the driest in 1990, whereas the wettest was observed in 2007 in Beaulieu sur Layon, and in 1998 in Saumur.

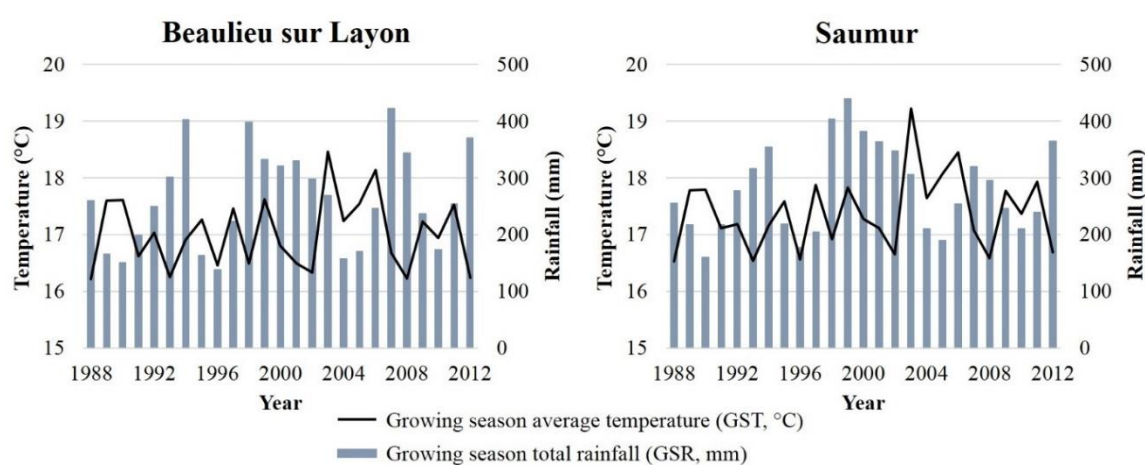


Figure 56: Growing season (April-September) average temperature and total rainfall in Beaulieu sur Layon and Saumur from 1988 to 2012 (Data source: Météo France).

7.2. Results

7.2.1. Exposure and sensitivity of wine quality to past and current climate conditions

One winegrower explained that *“it is the vintage effect that leaves its signature every year”*, giving the example of 2002 and 2003, two successive yet very contrasting climatic seasons. For the former, cool and wet, wines had low alcohol and high acidity levels with unripe flavors, whereas for 2003, which was very warm and relatively dry, wines had high alcohol and very low acidity levels with overripe flavors. All winegrowers defined inter- and intra-seasonal climate variations to be key variables influencing grapevine behavior and wine production (Table 17). There was good coherence among winegrowers as they described the wine quality of growing seasons over recent years. For both study areas, most winegrowers (80%) identified the highest quality wines to have been produced in 1989, 1990, 2005 and 2010. Almost all winegrowers (90%) agreed that the lowest quality wines were produced in 1991, 1992 and more than a half (65%) also mentioned 1994. Winegrowers’ capacity to recall detailed descriptions of wine quality (i.e. structure, flavor) along with their understanding of climate/vine/wine interactions, structured their perceptions of climate characteristics during past growing seasons. Winegrowers underlined that quality wines are produced when climate

conditions allowed for an early grapevine phenology, regular budburst and bloom, uniform berry ripening and fully ripened grapes (Table 17). As they differentiated between favorable and unfavorable climate conditions, three variables emerged as the most significant: the amount of heat units, the seasonal amount and timing of rainfall and the incidence of late-spring frosts.

Table 17: Winegrowers' descriptions of wine quality along with the associated perceptions of seasonal climate characteristics and their impacts on grapevine behavior and wine production.

Wine quality	Growing season	Growing season climate characteristics	Examples of impacts on grapevine behavior and wine production
Excellent	1989,1990, 2005,2010	Sunny, warm, dry season Rain at the right moment Warm, dry ripening period	Early vine phenology Regular budburst and bloom Grapes fully ripened
Very good	1995	Sunny, warm, dry season	Grapes fully ripened
	1996	Sunny spring, dry season	High sugar, phenolic content
	1997	Warm, dry ripening period	Grapes fully ripened
	2011	Dry spring, wet summer Warm, dry ripening period	Very early vine phenology Grapes fully ripened
Very good but atypical	2003	Very warm summer Heatwave Fairly dry season	Very early vine phenology Overripe grapes Atypical wine profile
Good	2007	Warm spring, Wet season Dry ripening period	Downy Mildew outbreaks Lower yield, good grape quality
	2009	Warm summer	High yields, good grape quality
Normal	1993	Cool season	Fruity, light structured wines
	1998	Heat wave in August	Sunburn of grapes
	2001,2002	Wet, cool season	Low sugar, high acidity content
	2004	Dry spring, wet August	Adequate grape ripeness
Poor	1999, 2006	Warm season Wet ripening period	High level of grey rot Short harvesting period
	2000,2012	Wet, cool season	High Downy Mildew outbreaks
		Wet ripening period	Late vine phenology, unripe grapes
	2008	Late-spring frost Wet, cool season	Late vine phenology Low yields, unripe grapes
Very poor	1991	Late-spring frost	Very low yields Irregular grapevine behavior
	1994	Wet ripening period	High level of grey rot
	1992	Wet, cool season	Very high yields, unripe grapes

7.2.1.1. Amount of heat units

Both study areas cultivate moderate-late ripening varieties at a northern latitude, generally less suitable for these varieties. Indeed, French wine growing regions at the same latitude, namely Burgundy and Alsace, cultivate early ripening varieties (e.g. Pinot Noir, Riesling), which require less heat to reach adequate ripeness levels (Huglin and Schneider 1998). For both study areas, winegrowers identified favorable conditions as sunny days with warm temperatures, which will cause higher heat unit accumulation. Firstly, more heat during spring is essential for an early grapevine behavioral response. In northern latitude vineyards, vine earliness shifts the ripening period to a warmer period of the year, favoring grape ripening and wine quality (Barbeau et al. 1998). Secondly, more heat necessarily generates greater ripening potential for both Chenin and Cabernet Franc.

Cool seasons are challenging as the amount of heat units is lower than the specific culture requirements, resulting in delayed vine phenology and unripe grapes (i.e. low sugar contents, high acidity levels). An insufficient amount of heat units also affects the physiological ripeness of Cabernet Franc, leading to unripe phenolic and flavor compounds. For Saumur Champigny, winegrowers explained that unripe grapes result in “low quality, acidic wines with green herbaceous flavors and aggressive tannins”. The effect of heat units on sugar loading implies that during cool seasons, grapes will struggle to achieve the necessary sugar content as required under appellation regulations. For Saumur Champigny, regulations require a minimum sugar content of 180 g/L for Cabernet Franc, while for Coteaux du Layon, the minimum sugar content is 221 g/L for Chenin. With a greater sensitivity to lower heat units in Coteaux du Layon, winegrowers explained that by waiting for adequate sugar contents during cool seasons, they are exposed to other climatic risks, particularly the arrival of autumn rain.

For both study areas, higher heat units favor vine phenology, grape ripening and wine quality. However, winegrowers stressed that with too many heat units (e.g. 2003) vine phenology and grape ripening evolves very rapidly. In 2003, the seasonal temperature in Beaulieu sur Layon and Saumur was respectively 1.4°C and 1.8°C warmer than average conditions (Figure 56). While wine quality was very good in 2003, wine structure and flavor were described as atypical (Table 17). All winegrowers explained that with very high sugar loading and rapid acid degradation during grape ripening, wines had high alcohol contents, low acidity levels and unfamiliar flavor profiles. Winegrowers from Saumur Champigny described wines in 2003 to be “more typical of wines produced in Southern France, than typical Saumur Champigny”. Winegrowers from Coteaux du Layon also observed very little infection by *Botrytis cinerea* in 2003. The latter is a fungal pathogen, which under specific environmental conditions during ripening produces noble rot, causing berries to shrivel and concentrate the sugars (Barbeau et al. 2001; Carey et al. 2004; Jackson 2008). In addition to the beneficial role of noble rot on concentrating sugars, it helps maintain an optimal acidity level and plays a key role in wine structure and flavor. With the absence of noble rot in 2003, the typicality of Coteaux du Layon wines was very different.

7.2.1.2. Seasonal amount and timing of rainfall

Winegrowers described the regional oceanic influence to bring about a regular rainfall pattern. With rainfall expected all year around, desired vine growth and health, grape yield and quality were underlined as strongly dependent on the seasonal amount and timing of rainfall. The former was emphasized as playing a central role in vine water supply and fungal pathogen outbreaks, whereas rainfall timing was associated with vine phenology.

Vine water supply is a key factor in grapevine behavior and potential wine quality (Matthews et al. 1990; Kennedy et al. 2002; Van Leeuwen et al. 2009). For both study areas, dry growing seasons were identified to be the most favorable for desired vine water supply. Indeed, all quality wines were produced during drier than normal seasons (Figure 56 and Table 17). Despite low rainfall amounts during these dry growing seasons (e.g. 1990, 2005), the regular rainfall pattern was described to be beneficial, bringing “rain at the right moment”. Wet seasons caused non-restricted vine water supply, which lead to extended and excessive vegetative growth, delayed grape ripening and inadequate ripeness levels. Together with

seasonal rainfall amounts, vine water supply varies depending on soil properties, varietal material and viticultural practices (Coulon-Leroy et al. 2012). Winegrowers from Coteaux du Layon recognized that their vineyards, planted on shallow slate soils, tend to be more exposed to restricted vine water supply, which is challenging during dry seasons. For Saumur Champigny, the deep calcareous soils were defined as causing higher exposure to regular and non-restricted vine water supply. Although challenging during wet seasons, these soil properties in Saumur Champigny were described as favorable for grapevine behavior under dry conditions. Winegrowers further identified Cabernet Franc to be more sensitive to drought than Chenin, while also describing rootstocks that induce moderate to high vigor to be more drought tolerant than low vigor rootstocks, which induces an early vine phenology (e.g. Riparia Gloire). As with vine water supply, dry growing seasons were identified as most favorable with regard to fungal pathogen outbreaks. Grapevines are very susceptible to fungal pathogens, which disrupt vine physiology and affect grape yield and quality (Jackson 2008). While weather conditions and optimal thresholds vary across fungal pathogens, wet conditions enhance their sporulation and infection on vine leaves and fruit clusters. Accordingly, the highest outbreaks, especially for Downy mildew, were described during wet growing seasons (e.g. 2000, 2012).

Lastly, with a regular rainfall pattern throughout the year, winegrowers described that rainfall is prone to occur during bloom or grape ripening, when dry conditions are crucial. Rainfall during bloom delays or inhibits the pollination and fertilization of grape flowers, which is detrimental for fruit set and productivity (Jackson 2008). In 2012, winegrowers explained that wet and cool conditions during bloom caused a greater occurrence of “coulure” (no fruit set) and “millerandage” (irregular and poor fruit set). Consequently, the yield losses observed for Cabernet Franc and Chenin were around 15 to 30%. As for bloom, rainy ripening periods are detrimental for grape yield and quality. Rainfall during ripening leads to increased berry size, diluting grape composition and flavor (Coombe and McCarthy 2000; Van Leeuwen et al. 2009). With high water uptake, berries can even split, causing further yield losses. Winegrowers described that wet conditions during ripening also result in greater incidences of grey rot (e.g. 1999, 2006) (Table 2). The Coteaux du Layon is particularly sensitive to these conditions as winegrowers pursue the infection of *Botrytis cinerea* to produce noble rot. With wet conditions, the *Botrytis* infection will however turn into grey rot and be detrimental for grape yield and quality. Climate conditions during ripening are therefore vital for optimal grape quality. Winegrowers said that “*even if seasonal conditions are not ideal, a warm and dry ripening period will allow for quality wine production, as in 2011*”.

7.2.1.3. Incidence of late-spring frosts

All winegrowers described that spring frosts are the most significant agro-climatic hazards, according to their northern geographical position. Since bud break generally takes place in April for Chenin and Cabernet Franc, the incidence of late-spring frosts was defined as extremely harmful. The most damaging late-spring frost occurred on April 21, 1991, where the minimum-recorded temperature in Beaulieu sur Layon and Saumur was -2.0°C. This single frost event caused severe leaf and bud injuries (Table 17). With frost injury to the

primary shoots, winegrowers explained that shoots developed from secondary or tertiary buds, which resulted in irregular vine and grape development. These differences in grapevine behavior together with very low grape yields resulted in brought about very poor quality wines.

Two types of frost are recognized: advection and radiation (Quénol et al. 2004; Madelin and Beltrando 2005; Poling 2008). When exposed to radiation frost, as in 1991, the local topography is closely associated with the spatial distribution of frost damage. In Coteaux du Layon, most damage was observed for low-lying vineyards, at the bottom of slopes. Indeed, as energy is lost through radiation upward from the soil surface at night, the colder air, denser and heavier than the warmer air, flows from higher to lower elevations due to gravity (Quénol et al. 2004; Poling 2008). The accumulation of cold air at these low-lying areas increases the risk of frost, while temperatures remain warmer at higher elevations. Bonnefoy et al (2012) studied the spatial variation of minimum temperatures in Coteaux du Layon during a radiation frost, illustrating that temperatures ranged from 1.3°C at high elevations to -3.1°C at low elevations. For Saumur Champigny, winegrowers similarly described the most severe frost damage to have occurred in low-lying vineyards. Frost damage was also influenced by the proximity of vineyards to the Loire River and to nearby vegetative obstacles. While the latter altered the flow of cold air, the Loire River played a moderating role, as water streams regulate temperatures and slow down nocturnal radiation cooling (Reynier 2007). Winegrowers described how vineyards located next to the Loire River demonstrated much less to no frost damage, whereas the most severe damage was observed for low-lying vineyards, located further from the Loire River. Saumur Champigny is particularly sensitive to frost events, as many vineyards are planted in low-lying areas. Historical harvest records reveal this greater sensitivity. The volume of red wine produced in Saumur Champigny was 26 363 hectoliters (hl) in 1991, compared to the average volume of 76,197 hl (1981-2010). Losses in 1991 were therefore around 65%. For Coteaux du Layon, 19,521 hl of sweet wine was produced in 1991, resulting in losses closer to 50% when compared to the average volume of 40 929 hl (1981-2010).

Frost damage also depends on the vine's ability to withstand strong nocturnal cooling. For grapevines, the threshold of frost susceptibility rises from -8°C in pre-budburst to -2°C in budburst stage (Regnier 2007). Winegrowers underlined that the severe damage caused by the late-spring frost in 1991 was also a result of an early vine phenology due to warm spring temperatures. In France, the late-spring frost of 1991 caused severe damage in Bordeaux and Languedoc-Roussillon. For these regions, an early vine phenology was also observed, while in Champagne and Burgundy, where the onset of vine phenology was later, damage was less significant (Insee 1992).

7.2.2. Changing viticultural practices in response to climate and non-climate related variables

Important changes in viticultural practices occurred for both study areas over recent decades. During the 1970 to 1980s, vineyards were vigorous, producing high yields and less-mature grapes. While climate conditions during those years were mostly cold-wet and less favorable for higher ripeness levels, common viticultural practices also consisted of selecting

vigorous, high yielding varietal material and adding fertilizers and soil amendments at regular intervals. Winegrowers from Saumur Champigny explained that those practices were linked with their end-product goals and market demands, i.e. “to produce light and easy to drink red wines for brasserie type restaurants”. The 1990s marked a turning point, initiated by the high quality seasons of 1989 and 1990, followed then by the poor seasons of 1991 and 1992 (Table 17). A winegrower explained, “With 1989-90, we realized that we could produce something more than table or average wine”. With the aim of producing quality wines more constantly and not only under favorable climate conditions, winegrowers understood that they had to reconsider their viticultural practices in order to better manage climate-related risks and opportunities.

From here, winegrowers focused mainly on three areas in their vineyards to improve wine quality. Firstly, vine vigor and grape yield were recognized as important features of grape ripeness and quality. Adjustments were made to existing practices (e.g. bud number per cane, soil amendments) along with the introduction of cover cropping, leaf and crop thinning practices. These practices allowed winegrowers to manage better vine vigor and grape yield depending on seasonal climate conditions. Secondly, greater interest was taken in understanding the influence of soil on vine and grape development. During the 1990s, the French national institute of agricultural research (INRA-URVV) in Angers developed a method to characterize vineyard soil properties (Morlat 2001; Bodin and Morlat 2006). Thanks to this scientific work, high-resolution soil data was freely available to winegrowers, in order to adapt and optimize plot-level management practices and to select the most suitable vineyards for wine production. Lastly, the concepts of grape ripening and optimal harvest dates evolved. For winegrowers from Coteaux du Layon, this meant a better understanding of the processes of over-ripening and noble rot development, while for winegrowers from Saumur Champigny, greater balance was pursued between technological (sugar/acidity) and physiological (phenolic compounds) ripeness levels. This transition towards producing higher grape and wine quality (i.e. from quantity to quality) had significant implications across soil, canopy and harvest management practices. Among those practices, vine inter-row management practices changed the most significantly for all winegrowers. It was also the most dynamic practice, changing at different temporal and spatial scales in response to climate and non-climate related variables.

7.2.2.1. **Vine inter-row management practices: trends, scales and causal factors**

During the 1970s to mid-1980s, chemical weeding was commonly used, replacing horse-drawn cultivators (Figure 57). Winegrowers rapidly implemented chemical weeding, as it was less labor intensive and more cost effective. The mid-1980s to mid-1990s marked a transitional period towards perennial cover cropping systems. At that time, INRA-URVV, along with extension officers of Anjou-Saumur, carried out trials, demonstrating the role of cover cropping in managing vegetative growth for vineyards with ample soil depth and moisture (Morlat and Jacquet 2003). Indeed, cover crops compete with vines for soil, water and nutrients, reducing vine vigor and grape yield. Other advantages of cover crops include improved vine earliness, enhanced environmental protection and increased soil fertility, structure and tractability (Morlat and Jacquet 2003; Ingels et al. 2005; Tesic et al. 2007).

Cover crops also reduce fungal pathogen and soil erosion risks. Initially, winegrowers planted perennial grass cover crops in young or vigorous vineyards, but then from the 1990s, systemically in all vineyards, whatever the soil property. In response to multiple exposures, the various advantages induced by cover crops lead winegrowers to identify perennial cover cropping as the most appropriate practice for vine inter-rows (Figure 57). Indeed, favorable climate conditions in 1989 and 1990 (i.e. sunny, warm and dry) contributed to winegrowers' evolving perceptions of potential grape and wine quality. At that time, environmental protection agencies and appellation regulations were imposing more constraints on the use of chemical weeding. Likewise, the first mechanical harvesters were introduced to Saumur Champigny in the late 1980s, demanding good soil tractability, while for Coteaux du Layon, previously abandoned steep slopes with high erosion risks were once again cultivated.

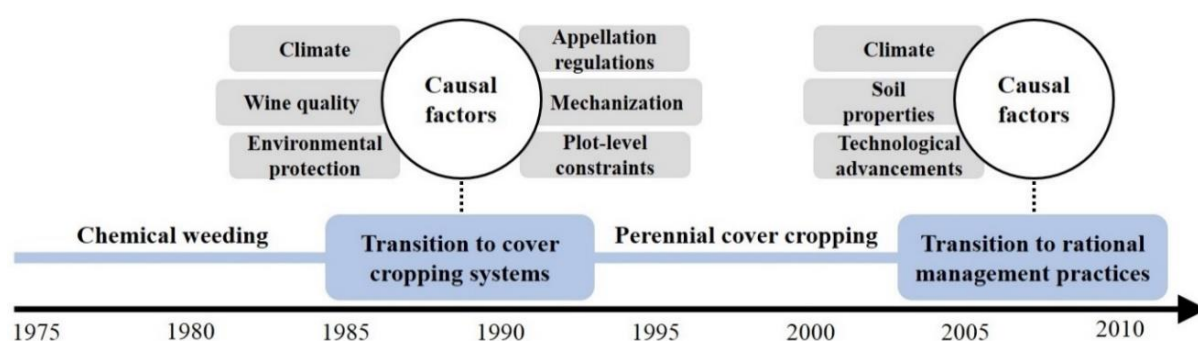


Figure 57: Temporal trends and causal factors identified for vine inter-row management practices.

From the mid-2000s, a transition took place towards more rational inter-row management. Perennial cover crops, especially the grass species, perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreber), became too competitive with vines. Winegrowers described how vineyards displayed less winter pruning wood, greatly reduced vine vigor and grape yield, low vine nitrogen levels and slow or delayed sugar loading. Grape musts with low nitrogen contents also caused slow or stuck alcohol fermentation and limited the potential intensity of wine aromas. Despite the various advantages of cover crops, winegrowers recognized that they had “gone too far in their cover cropping systems, allowing too much competition”. An important factor was that vine inter-row management practices were not reasoned according to the variations in soil properties at plot levels. Winegrowers from Coteaux du Layon notably emphasized that their vineyards are less suited to perennial cover cropping systems, due to their specific soil properties (Table 16) in an already dry regional climate (seasonal rainfall $\pm 260\text{mm}$). Warmer and dryer than normal conditions over the last decade were also identified as having intensified competition between cover crops and vines. For vineyards with poor soil depth and moisture, shallow soil-tillage practices were introduced in each or every second vine inter-row. Technological advancements in soil-tillage tools, which vary in tillage depth, width and intensity, were underlined to have facilitated their application in vine inter-rows. In other cases, less competitive grass and legumes species were selected, or natural vegetation was allowed to grow. However, for vigorous vineyards with ample soil depth and moisture, perennial grass cover crops remained in each vine inter-row.

7.2.3. Winegrowers' adaptive responses to climate conditions

For both study areas, winegrowers identified most adaptive responses to occur during harvest and winemaking (i.e. tactical and reactive). Depending on the evolution of grape ripening, coinciding climate conditions and grey rot risks, winegrowers adapt by adjusting harvest management practices. This is especially true for wet ripening periods, where winegrowers defined harvest “windows” to be relatively small. While winegrowers from Saumur Champigny can intervene rapidly with harvesting machines (i.e. day/night), winegrowers from Coteaux du Layon are more restricted. Indeed, regulations only allow manual harvesting (i.e. slow and labor intensive) where winegrowers pass several times in vineyards to hand select grape bunches having reached optimum ripeness. During harvest, winegrowers similarly have to manage the diversity in grape yield and quality, as local environmental properties will cause geographically spread-out vineyards to perform differently. Winegrowers highlighted this diversity to be beneficial, where blending wines made from different but complementary vineyards lets them maintain wine quality and style under diverse climate conditions. For example, grapes from cool vineyard sites bring acidity during hot growing seasons, while for frost or hail (i.e. local extreme events), undamaged vineyards ensure grape yield and quality. Among winemaking techniques, winegrowers can further change planned wine styles (e.g. due to inadequate grape ripeness). A winegrower from Saumur Champigny explained that, “Instead of producing average red wines, it is better to produce rosé wines, thanks to a good rosé market that exists”.

Still, the impacts of climate variations are not new and adapting to those conditions has always been a constant challenge faced by winegrowers. Winegrowers underlined that through various learning experiences, shared knowledge (i.e. practical and scientific) and changing viticultural practices, they enhance their adaptive responses (i.e. tactical or strategic). A winegrower said, “It takes bad vintages to judge a good winegrower and to improve viticultural practices. During good vintages, everyone makes quality wines”. Accordingly, winegrowers have developed various adaptive responses (Table 18), in particular to manage those climate conditions related to exposure and sensitivity of wine quality.

7.2.3.1. Managing heat accumulation

Canopy management practices (i.e. tactical responses) control the amount of sunlight exposure on leaves and grapes and the amount of airflow within the vine canopy (Marais et al. 1999; Hunter 2000; Bergqvist et al. 2001; Spayd et al. 2002). During cool growing seasons, winegrowers advance canopy management practices (anticipatory) or use more severe leaf, shoot and crop thinning (reactive). These tactical responses to cool conditions will improve canopy structure and create a warmer microclimate, which enhances the heating of grapes and the synthesis and concentration of berry compounds (e.g. sugars, anthocyanins). Although removing leaves and shoots has several benefits during cool seasons, winegrowers highlighted the potential risk for sunburn.

During the cool and wet growing season of 1998 (Figure 56), the month of August was characterized by a heat wave with daily temperatures exceeding 35°C. As cool spring and

summer temperatures brought about early and severe leaf and shoot thinning, grapes were exposed to unexpected high August temperatures that caused significant sunburn damage. This resulted in grape berries shriveling and drying out, which was detrimental to both grape yield and quality. Winegrowers underlined that grape susceptibility to heat damage or sunburn increases with grape ripening and berry softening, identifying Chenin to be more sensitive than Cabernet Franc. Within this perspective, winegrowers implement a two-step adaptive response to reduce the potential for sunburn, i.e. first removing leaves on the morning sun side (cooler sun) and depending on the climate conditions, a second leaf thinning on the afternoon sun side towards the end of summer.

During warm growing seasons, winegrowers conversely delay canopy management practices or apply less severe leaf and shoot thinning. These tactical responses to warm conditions will reduce sunlight exposure on grapes, favoring a cooler microclimate that allows grapes to retain more acidity. Winegrowers also described strategic responses to manage heat accumulation, namely adjusting trellis system height and pruning length (i.e. reactive) or via site selection (i.e. anticipatory). At high latitudes in the northern hemisphere, south facing slopes will receive more direct sunlight than north facing slopes (Huglin and Schneider 1998). Accordingly, winegrowers from Coteaux du Layon mainly select steep south-, southeast- or east-facing slopes for planting vineyards, since Chenin requires high amounts of heat units to reach adequate sugar contents for sweet wine production.

Table 18: Types of adaptive responses used by winegrowers to manage diverse climate conditions.

Adaptive responses	Climatic stimuli	Examples of viticultural practices
Tactical, reactive	Cool, wet	More severe leaf, shoot, crop thinning
	Warm, dry	Less severe leaf, shoot thinning Foliar nitrogen fertilization
	Wet ripening period	Several harvests via bunch selection Harvesting at night by machine
	Frost	Requesting crop insurance Turning on heaters/wind machines
Tactical, anticipatory	Cool, wet	Advancing canopy management practices Allowing natural vegetation to grow Higher number of fungicide treatments
	Warm, dry	Delaying canopy management practices Shallow soil tillage
	Frost	Delaying winter pruning Mowing cover crops
Strategic, reactive	Cool, wet	Longer cane pruning
	Warm, dry	Changing perennial cover crop species Increasing the trellis system height
Strategic, anticipatory	Cool, wet	Site selection
	Dry	Choice of rootstock variety
	Frost	Site selection. choice of grapevine variety

7.2.3.2. Managing vine water supply

Over the short term, winegrowers manage temporal variations in vine water supply through vine inter-row practices (i.e. tactical), where anticipatory responses were defined to be essential. Contrary to reactive responses, anticipatory responses let actions be taken before

critical thresholds are reached (e.g. severely restricted water supply), which can lead to irreversible impacts on grapevine behavior. For vineyards with tilled or cultivated vine inter-rows, winegrowers will allow weeds and natural grasses to grow during wet growing seasons. In addition to regulating vine vigor and improving vine earliness, weeds and natural grasses ensure good soil tractability for treatment, as wet conditions inevitably imply higher disease risks. Under normal and dry conditions, winegrowers will return to a clean cultivation or shallow soil tillage.

For vineyards with annual or perennial cover cropping systems, winegrowers will perform a shallow soil tillage in each/every second vine inter-row during dry growing seasons. As cover crops, in particular perennial species, require a long time to grow and establish themselves, winegrowers underlined the difficulty and great uncertainty in removing cover crops when confronted with strong inter- and intra-seasonal climate variations. For example, cover crops may be required within the same or following growing season to provide good soil tractability for harvesting machines or to reduce soil erosion with winter rainfall. In this context, two winegrowers from Coteaux du Layon demonstrated innovative practices to manage climate variations. The first planted an annual cereal crop in vine inter-rows. This cover crop will provide good soil tractability, while reaching maturity early during the growing season in order not to compete with vines during grape development and ripening. The second winegrower introduced a mechanical tool, called “rolo-faca”. Instead of mowing or removing natural vegetation and weeds in vine inter-rows during dry growing seasons, the “rolo-faca” will roll over the vegetation, creating a sort of living mulch layer allowing its self-reproduction through seeds.

Over the long term, winegrowers manage vine water supply through the choice of annual and perennial cover crop species (i.e. strategic and reactive) or via site selection and choice of rootstock varieties before planting (i.e. strategic and anticipatory). In response to warm and dry trends over the last few decades, winegrowers from Coteaux du Layon have selected increasingly drought-resistant rootstock varieties, namely Gravesac, 1103 Paulsen and 110 Richter. However, winegrowers from Saumur Champigny are more restricted in the choice of rootstock varieties, as they have to select rootstocks suited to calcareous soils (i.e. Fercal/SO4). In situations where active calcium carbonate levels are lower or for non-calcareous soils, winegrowers primarily plant Couderc 3309.

7.2.3.3. **Managing fungal pathogen outbreaks**

Winegrowers use physical, biological or chemical adaptive responses to manage fungal pathogen risks or outbreaks (Nicholas et al. 2012). Physical responses involve regulating vine growth directly or indirectly through canopy and vine inter-row management practices respectively, where winegrowers defined a well-ventilated vine canopy to be less susceptible to disease. Biological and chemical responses were a function of winegrowers' disease management strategies, which Barbeau et al. (2014) similarly reported. Organic winegrowers only use contact fungicides, while conventional and integrated winegrowers may alternate between contact and systemic fungicides. Organic winegrowers explained that while maintaining an optimal foliar coverage is relatively simple under dry conditions, wet seasons are very difficult. Unlike systemic fungicides, contact fungicides must be applied correctly

with expected rainfall (i.e. anticipatory), as this washes the treatment from vine leaves and limits vine protection. As a result, organic winegrowers underlined the importance of reliable rainfall predictions (i.e. duration and intensity), whereas integrated winegrowers will take fewer risks during wet seasons, following a more conventional strategy. Across all winegrowers, regular vineyard visits were essential to monitor fungal pathogen risks or to follow-up and evaluate treatment actions.

7.2.3.4. **Managing late-spring frosts**

The close relationship between local topography and frost damage meant that winegrowers' frost protection methods varied spatially and were either passive or active. Passive protection includes indirect methods (e.g. site selection, pruning techniques) carried out in advance to reduce the vineyards' susceptibility to frost damage (Poling 2008). Active protection is the use of direct methods (e.g. wind machines, heaters, over-vine sprinklers), applied just before or during frost events. For both study areas, the most important strategic responses to late-spring frosts were passive methods, namely site selection and choice of grapevine variety. Winegrowers will avoid planting vineyards in frost-prone areas (e.g. low-lying) or select late-ripening varieties for those areas (e.g. Cabernet Sauvignon). Because late-ripening varieties require more heat to trigger bud break, a delayed vine growth reduces the potential exposure to spring frosts. Nevertheless, winegrowers explained that since these varieties with high heat requirements generally do not reach adequate grape ripeness, they are mainly used to produce sparkling wines.

As the incidence of late-spring frosts is also highly variable over time, winegrowers take risks in planting Chenin or Cabernet Franc in frost-prone areas. Yet, only a few winegrowers had fuel heaters in vineyards and one winegrower from Saumur Champigny invested in a wind machine. During radiation frost conditions, wind machines mix warmer air aloft with colder air nearest to the soil surface, consequently increasing the air temperature around vines. The absence of these active protection methods for most winegrowers was because their vineyards are geographically spread out. They explained that installing heaters, and especially wind machines, should be a collective strategic response. Indeed, the installation and operating costs for wind machines are high and the investment is only justified for large vineyard surfaces (Poling 2008).

Accordingly, winegrowers similarly depend on passive protection for Chenin and Cabernet Franc vineyards, planted in frost-prone areas. Passive protection methods included the adjustment of vine inter-row management practices (i.e. tactical responses). The amount of heat absorbed during the day and radiated at night depends on soil properties (e.g. texture, porosity) and surface cover. Cover crops restrict heat absorption, resulting in lower night temperatures during spring frosts (Donaldson et al. 1993; O'Connell and Snyder 1999). For vineyards in frost-prone areas, winegrowers therefore described that early spring mowing of cover crops is undertaken. This increases soil surface exposure to sunlight, allowing more heat absorption that will enhance heat release at night and reduce frost susceptibility. Winegrowers also underlined that soil tillage or cultivation should be avoided prior to frost events. Shallow tillage or cultivation loosens the soil structure, leaving more pore space for air (Jackson 2008). As air is a poor conductor of heat, these practices carried out in spring

may increase the potential for frost damage. Through pruning management practices, winegrowers similarly reduce the vineyards' susceptibility to frost. For vineyards in frost-prone areas, the main strategy is to postpone winter pruning. Late pruning will delay the onset of bud break and vine growth (Reynier 2007; Jackson 2008), reducing the exposure to frost damage. Some winegrowers also increased the vine training height or delayed the downward bending of the fruiting cane during spring (i.e. from which annual vine growth and grape clusters emerge). Indeed, night temperatures are the coldest near the soil surface during radiation frost conditions (Quénol et al. 2004; Poling 2008). As night temperatures rise with the height above ground, the higher position of sensitive vine parts will improve frost protection.

7.2.4. Winegrowers' perceptions and adaptation priorities to climate change

In France and Europe, winegrowers from several wine growing regions have observed regional climate changes and their impacts on vine phenology and grape quality (Battaglini et al. 2009; Rochard et al. 2010). For both study areas, most winegrowers (80%) also described a changing climate together with observed changes in phenological stages, harvest dates, grape compositions and to a lesser extent, altered manifestations of vine pests and diseases. They highlighted that due to higher sugar contents, the common winemaking practice of adding sugar for must enrichment had rarely been used since 2003. Recent climate changes were identified as having been favorable for grapevine behavior, with positive impacts on overall grape and wine quality. One winegrower said, "Since 1990, there have been a series of good vintages compared to those of my parents. Previously, quality vintages were mostly limited to one or two per decade". Winegrowers were nevertheless careful not to identify climate change as the main causal factor, stressing that their evolving viticultural practices have played a significant role in improving grapevine behavior and wine quality. For the Loire Valley, temperature trends have been shown to explain only about 60% of the changes in grape quality from 1981 to 2010 (Neethling et al. 2012).

Concerning the persistence and future direction of regional climate changes, all winegrowers described a great uncertainty. They perceive climate conditions to be more dependent on natural variability, i.e. variations between cold and wet periods as in the 1960s to 1970s, followed by warm and dry periods since 1990. The cold and wet climate conditions of 2012 were highlighted as an indication that the regional climate could return to a cold and wet period. Winegrowers agreed that if conditions become warmer and drier over the 21st century, these climate changes could bring about various opportunities as well as risks for grape growing and winemaking in both study areas. They associated future climate-related opportunities with improved conditions for grape ripening and wine quality, whereas climate-related risks were particularly linked with the potential impacts on regional wine typicality. They explained that a different wine structure and flavor, such as in 2003, could cause confusion to consumers who are familiar with their wines.

For both study areas, winegrowers' uncertainties about future climate changes were reflected in their outlook on adaptation priorities over the 21st century. As the perception of risk influence adaptation priorities at individual or community levels, greater uncertainty or less believe in potential future risks may be a limiting factor for strategic adaptation measures

to long-term climate changes (Reid et al. 2007; Adger et al. 2009). As a result, winegrowers placed the highest priority on harvest management practices and winemaking techniques, while changing grapevine varieties and using irrigation for vine water supply received the lowest priority (Figure 58). Winegrowers said that before changing the grapevine varieties currently grown in both study areas, it is first necessary to intensify soil and canopy management practices or to introduce new innovative practices such as the “rolo-faca”. From here, they underlined that with further changes to climate conditions (e.g. warmer and drier), it will subsequently become necessary to adapt by changing rootstock varieties or planting vineyards on soils with greater depth and moisture. Goulet and Morlat (2010) illustrated that very few vineyards in the middle Loire Valley are planted with the most suitable rootstock variety for their specific soil properties. Winegrowers pointed out that small vineyard surfaces could now be planted with varieties more suited to warm and dry conditions, in order to understand the grape growing and winemaking potential of the varieties in their environmental conditions. As for the use of irrigation, producing wines from these varieties is not permitted under appellation regulations, which means that this becomes a collective discussion with policymakers. Irrigation was identified as the best alternative response to drought (i.e. after soil management practices or choice in rootstock variety), yet winegrowers explained that because their vineyards are highly spread out, implementing irrigation systems would likewise be a collective adaptation measure. From winegrowers’ responses, it is possible to classify the various adaptation strategies at different temporal scales, from short to long term, knowing that these strategies will vary, depending on vineyard-scale characteristics (e.g. soil properties, topographical features, grapevine and rootstock varieties).

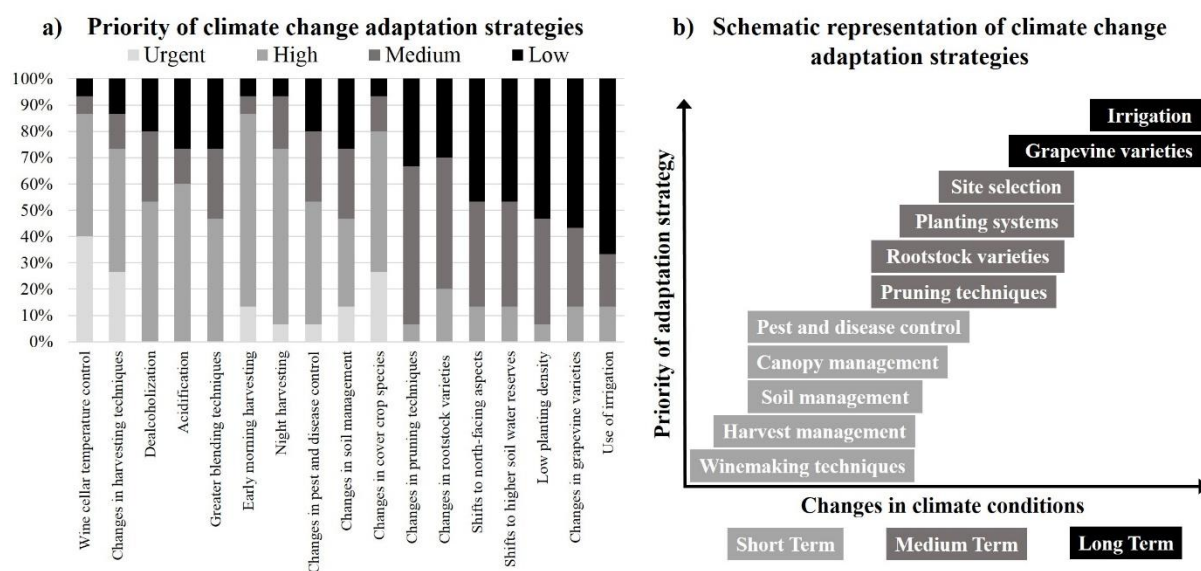


Figure 58: Based on the responses of winegrowers from Saumur Champigny, a) the priority of climate change adaptation strategies and b) its schematic representation in the short, medium and long term over the 21st century.

CONCLUSION

This case study was conducted in two regulated wine producing areas in the Anjou-Saumur wine growing sub-region, France. Using data collected through semi-structured interviews with thirty selected winegrowers, study findings have provided important insights on local climate vulnerability and winegrowers' adaptive processes. Within the context of climate change and the key issues surrounding adaptation, this study highlights the importance of local, contextual knowledge in framing vulnerability and understanding its differences across and within wine growing regions. With a focus on wine quality, study findings have shown that in addition to the regional prevailing climate, local environmental features and socio-economic aspects are key determining factors of exposure and sensitivity. As each wine growing region consist of unique contexts (e.g. physical, environmental, social, economic), knowledge and understanding of those contextual factors, and their interaction with the regional climate, will be essential for winegrowers to identify and prioritize adaptation initiatives. Indeed, dealing with current exposure and sensitivity constitute a first step towards adapting to future vulnerability to long-term climate changes. Through constant learning experiences and a range of management practices, study findings have also shown that winegrowers' decision-making is an on-going process, depending on many climate and non-climate-related factors. Assessment approaches, as in this study, are therefore essential to outline those deciding factors that assist or constrain the process of autonomous adaptations. Alongside winegrowers' autonomous adaptations, there is a need for policy and research to assist winegrowers in planning adaptation responses to uncertain long-term climate changes, as the latter is likely to be overshadowed by short-term climate variability and limited by winegrowers uncertainties in future climate trends. High-resolution climate change projections along with a more detailed understanding of local vulnerability will provide winegrowers' with better perspectives of potential future agro-climatic potentials and adaptation strategies necessary at different temporal (short to long-term) and spatial scales (local to regional). Nevertheless, local climate vulnerability remains a complex process, where the influence of non-climatic factors will have important consequences on the nature of future vulnerability.

CONCLUSION GÉNÉRALE

A travers le temps et l'espace, le climat a toujours exercé un rôle central sur la viticulture. Dans la poursuite d'une production de vin orientée vers la qualité, cette relation étroite entre le climat et la vigne a constamment amené les viticulteurs à ajuster leurs activités. Confrontés aux changements climatiques actuels, qui devraient se poursuivre au cours du 21^e siècle, les viticulteurs sont à nouveau sollicités à repenser leurs pratiques et stratégies viticoles. Cependant, l'adaptation au changement climatique implique de nombreux questionnements : quels sont les impacts attendus à court terme sur la qualité et la typicité du vin ou à long terme sur l'adaptation des cépages ? De même, comment l'adaptation doit-elle être effectuée dans l'espace afin de tenir compte des spécificités locales ? L'objectif de cette thèse a été de répondre à ces questions clés qui abordent le changement climatique et la viticulture afin d'accompagner les viticulteurs dans une démarche d'adaptation au changement climatique.

- La première étape (Chapitre 4) a été d'analyser les tendances futures du climat en Anjou-Saumur. En effet, l'étude des projections climatiques constitue un aspect important dans la formulation d'une compréhension des impacts attendus sur la viticulture. A l'échelle du vignoble d'Anjou-Saumur, une poursuite du réchauffement est attendue au cours du 21^e siècle, faisant évoluer son climat viticole de « frais » à « tempéré », ceci sous réserve des mesures d'atténuation. En effet, selon le scénario climatique le plus pessimiste (RCP 8.5), le climat pourrait même être comparable au climat actuel du sud de la France. Bien qu'aucune modification significative concernant les précipitations n'ait été mise en évidence, l'intensité de la sécheresse est susceptible d'évoluer.

“Consistent with findings in many wine growing regions, results demonstrate that the viticultural climate class of Anjou-Saumur is predicted to change significantly. According to the Winkler Index, Anjou-Saumur is likely to shift from a “Region I” to a “Region II” in the medium future (for all scenarios), while to a “Region III” (RCP 4.5) or a “Region IV” (RCP 8.5) in the far future. [...] However, rainfall distribution over the growing season, as revealed by the rainfall frequency index, is likely to change significantly. In the near future, the number of wet days are predicted to increase by about +14%, whereas in the far future, the number of wet days are projected to decrease by -10.7% to -28.6%.” (Chapter 4).

Une des spécificités de la sous-région Anjou-Saumur étant sa grande diversité viticole, les changements climatiques entraîneront des conséquences diverses, à la fois bénéfiques ou négatives, en fonction de différents critères tels que le cépage cultivé, la nature du sol ou encore le type de vin produit.

“Projected trends in viticultural indices suggest that Anjou-Saumur is expected to evolve from a suitable climate for early ripening varieties (e.g. Gamay) to a climate suitable for medium ripening varieties such as Chenin and Cabernet franc. It may also become suitable for late ripening varieties (e.g. Syrah, Grenache) by 2071-2100 under the scenario RCP 8.5” (Chapter 4).

Cependant, plusieurs incertitudes découlent de ces projections (e.g. scénario climatique, modèle d'impact,...). Bien que les techniques de modélisation climatiques aient beaucoup progressé au cours de la dernière décennie, leurs résultats restent incertains à l'échelle spatiale où l'adaptation doit s'appliquer, c'est-à-dire, la parcelle viticole.

- Les deuxième et troisième étapes (Chapitres 5 et 6) ont eu pour objectif de répondre à ce défi, c'est-à-dire, acquérir une meilleure compréhension du climat local et de son influence sur la vigne. A l'aide de mesures climatiques et agronomiques adaptées, la forte variabilité spatiale du climat local a été mise en évidence.

“During the growing seasons of 2013 to 2015, an important spatial variability in temperatures was observed. Between temperature data loggers, average growing season temperatures varied by 0.6°C to 0.8°C in Coteaux du Layon, and by 0.7°C to 1.1°C in Saumur Champigny. At the same time, minimum growing season temperatures varied by 1.5°C to 1.8°C in Coteaux du Layon, and by 1.5°C to 1.8°C in Saumur Champigny. Whereas maximum growing season temperatures varied by 1.1°C to 1.4°C in Coteaux du Layon, and by 0.9°C to 1.0°C in Saumur Champigny. [...] In studying the influence of local landscape features on growing season temperatures, elevation was found to be the most significant factor explaining minimum growing season temperatures” (Chapter 5).

Cette variabilité climatique, liée principalement aux caractéristiques topographiques et pédologiques locales, s'est traduite par des différences au niveau de la phénologie de la vigne et de la composition des raisins. Par exemple, les parcelles, dont la température moyenne (durant la saison végétative) est élevée, sont caractérisées par une riche concentration en sucre et un faible niveau d'acidité.

“For each growing season, the timing of flowering and veraison varied strongly between the studied vineyard plots. In Coteaux du Layon, the occurrence of flowering varied by 4 to 5 days. While in Saumur Champigny, it ranged by 3 to 5 days. The observations in veraison displayed greater dissimilarities. In Coteaux du Layon, the timing of veraison varied by 6 to 8 days, and in Saumur Champigny, by 6 to 11 days. [...] Considering the day of the year when sugar contents of 170 g/L were reached, the differences between vineyard plots were very important. They ranged between 20 to 25 days for the AOP Coteaux du Layon and between 11 to 18 days for the AOP Saumur Champigny, depending on the growing season. A strong spatial variability in grapevine phenology was therefore observed within each study area. For example in the Coteaux du Layon, the implications of these difference meant that during ripening, some vineyard plots were in the stage of normal ripening, whereas others plots have already reached the stage of over-ripening,

either through the process of “passerillage” (on-vine grape drying) or noble rot (botrytised grapes)” (Chapter 6).

Connaitre les variations climatiques à échelle fine doit permettre de mieux évaluer et anticiper le comportement de la vigne dans le contexte du changement climatique. Ainsi, cette connaissance de la variabilité spatiale du climat apparaît comme un outil d'adaptation permettant aux viticulteurs de compenser les effets du changement climatique. D'un point de vue purement technique, hormis pour le scénario climatique le plus pessimiste (RCP 8.5), une adaptation raisonnée des pratiques culturales annuelles et pérennes spécifiques à chaque viticulteur en relation avec la connaissance des climats locaux devrait permettre de maintenir la culture des cépages actuels dans leur aire viticole traditionnelle. A l'échelle d'une appellation, les secteurs les plus favorables à un bon fonctionnement de la vigne pourraient évoluer dans un contexte d'une réorganisation spatiale. Par exemple, les parcelles caractérisées par une orientation au sud ou une réserve en eau faible et qui sont considérées aujourd'hui les milieux ayant la meilleure qualité de raisin, pourraient évoluer dans le futur vers des milieux jugés à présent comme moins qualitatifs pour la viticulture (e.g. orientation au nord, sol profond avec une forte réserve en eau,...).

- Toutefois, il est impossible de penser l'adaptation sans s'intéresser aux viticulteurs. Par conséquent, le chapitre a abordé l'évaluation de la vulnérabilité locale et de la capacité d'adaptation des viticulteurs. A travers les entretiens réalisés, les résultats ont souligné qu'au-delà du climat, la vulnérabilité locale dépend de divers facteurs contextuels (i.e. environnementaux et socio-économiques). D'autre part, ils mettent en avant leur dynamisme et les capacités d'adaptation qu'ils ont acquis par leur expérience et leur connaissance.

“With a focus on wine quality, climate-related exposure and sensitivity were dependent on many contextual factors (e.g. northern geographical position, wine regulatory frameworks, local environmental features) interacting with the regional oceanic climate. [...] Winegrowers underlined that through various learning experiences, shared knowledge (i.e. practical and scientific) and changing viticultural practices, they enhance their adaptive responses (i.e. tactical or strategic)” (Chapter 7).

En effet, les viticulteurs doivent réagir dans un contexte en constante évolution dans lequel ils doivent prendre en considération les facteurs contextuels. Ces facteurs varient à la fois entre les régions, mais aussi au sein d'une même région ; certains sont décisifs car ils peuvent aider ou entraver le processus d'adaptation. Ainsi, pour accompagner au mieux les viticulteurs, il est essentiel de prendre en compte ces facteurs et leurs interactions, de façon à mieux connaître les priorités d'adaptation à différents niveaux. Cependant, le contexte d'un climat changeant n'est pas encore une priorité auprès des viticulteurs. A partir de leurs réponses, il était possible de classer les stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles, sachant que, dans le détail, elles diffèrent selon la nature du sol, le cépage et le système de commercialisation. Compte-tenu de leurs incertitudes sur l'évolution future du climat ainsi que de la réglementation, les viticulteurs restent très prudents dans leurs choix, mettant en avant les adaptations à court terme.

“Regarding future climate trends, winegrowers’ displayed great uncertainty, placing the most urgent adaptation priority on short-term strategies, while changing grapevine varieties and using irrigation were identified as last resort strategies” (Chapter 7).

Avec comme perspective d’accompagner les viticulteurs dans l’adaptation au changement climatique, il devient nécessaire de développer des outils permettant d’évaluer les méthodes et les stratégies d’adaptation aux potentialités agroclimatiques actuelles et futures. Le comportement humain et ses interactions avec son environnement sont des questions clés pour comprendre l’organisation viticole. A ce titre, le développement d’un modèle multi-agents est très approprié. En effet, cette approche de modélisation répond au besoin de formaliser une relation cohérente entre les activités des viticulteurs, la dynamique du comportement de la vigne, les processus environnementaux actuels et futurs aussi bien que les contraintes techniques, socio-économiques et réglementaires. En Anjou-Saumur, à l’échelle du site d’étude de l’AOP Coteaux du Layon, un prototype de modélisation multi-agents a été développé (Annexe 10). Structuré autour de trois types d’agents (i.e. vignes, viticulteurs, superviseurs), chaque agent est capable d’interagir avec son environnement, avec les autres agents, tout en poursuivant ses propres objectifs. Les relations entre ces trois types d’agents déterminent les stratégies de production adoptées par les agents viticulteurs.

Les premiers résultats obtenus, même s’ils restent partiels, montrent que le modèle multi-agents développé est en mesure de restituer la dynamique de la vigne et de simuler les itinéraires techniques en lien avec la variabilité des conditions environnementales actuelles. Par exemple, les simulations effectuées sur des années climatiques contrastées montrent une forte variabilité des dates du cycle végétatif et reproductif de la vigne. De même, en fonction du profil climatique de l’année, les pratiques viticoles et outils d’adaptation mis en œuvre par les viticulteurs sont très variables. Par exemple, dans un contexte climatique « sec », les simulations montrent que les activités liées au travail du sol sont favorisées alors que dans un contexte « humide », les activités sont plus nombreuses et concernent notamment les traitements phytosanitaires et l’entretien de l’enherbement dans les inter-rangs (Annexe 11). Le modèle multi-agents peut ainsi permettre de mettre en évidence le comportement spécifique des viticulteurs, d’évaluer l’impact de leurs prises de décision sur la vigne à différentes échelles spatio-temporelles (e.g. réactives ou anticipées) ou de connaître l’émergence des nouvelles pratiques (e.g. utilisation de l’irrigation dans un scénario d’une sécheresse accrue).

A l’issue de cette première phase de développement, de nombreuses perspectives sont envisagées. Elles concernent : i) l’intégration des résultats liés aux mesures à échelle fine (Chapitre 5, 6 et 7) permettant d’améliorer la robustesse du modèle et ainsi de limiter les incertitudes (i.e. validation avec les données obtenues sur le terrain) et ii) l’intégration des projections climatiques régionalisées (Chapitre 4) permettant de proposer des scénarios plausibles de l’impact du changement climatique à l’échelle des vignobles, et comment proposer des stratégies d’adaptation raisonnée à différentes échelles temporelles (i.e. court, moyen, long terme) et spatiales (i.e. parcelle, exploitation, territoire).

Sur le plan pratique, durant l’étude de cette thèse, un premier transfert de résultats a été mis en place auprès des viticulteurs, leur donnant ainsi accès à des informations nouvelles, telles

que l'évolution du bilan hydrique à l'échelle de leurs parcelles, informations qu'ils peuvent prendre en considération dans l'adaptation de leurs pratiques d'entretien du sol et gestion de la canopée. Cette transmission d'information ainsi que le développement du modèle multi-agents sont aujourd'hui poursuivies dans le cadre d'un projet européen : Life-ADVICLIM (2014-2019).

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AOP	Appellation d'Origine Protégée
BEDD	Biologically Effective Degree Days
CI	Cold night Index
CO₂	Dioxyde de carbone
DJC	Degrés-Jours de Croissance
DI	Dryness Index
GDD	Growing Degree Days
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ha	Hectares
HI	Huglin Index
IF	Indice de Fraîcheur des Nuits
IH	Indice de Huglin
IS	Indice de Sécheresse
Mha	Millions d'hectares
nm	Nanomètre
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OIV	Organisation Internationale de la vigne et du Vin
PAR	Photosynthetically active radiation
PDO	Protected Designation of Origin
RCP	Representative Concentration Pathways
RPA	Rayonnement photosynthétiquement actif
SRES	Special Report on Emission Scenarios
UV	Ultraviolet
WI	Winkler Index

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cadre conceptuel de l'étude	5
Figure 2 : La phylogénie simplifiée du genre <i>Vitis</i> (Reynier 2007)	10
Figure 3 : a) La réponse de l'activité photosynthétique de la vigne à la température de l'air (T, °C) (Carbonneau et al. 2007) ; b) l'effet de la température de l'air sur la concentration des composés de raisins (Coombe 1987) ; et c) les réponses du développement phénologique de la vigne à l'accumulation des températures moyennes journalières de l'air (Tm, °C) (Molitor et al. 2014).....	13
Figure 4 : Classification d'une large gamme de cépages (i.e. du plus précoce au plus tardif) selon leurs exigences thermiques pour atteindre la mi-floraison (la durée jusqu'à la mi-floraison est indiquée en noir), la mi-véraison (la durée floraison-véraison est indiquée en gris clair) et la concentration en sucre de 200 g/L (la durée véraison-sucre de 200g/L est indiquée en gris foncé). Ces exigences correspondent aux sommes de températures moyennes journalières calculées à partir du 1 mars dans l'hémisphère nord (i.e. jour 60), avec une température de base est de 0°C (Parker 2012).	14
Figure 5 : L'exemple de la représentation schématique des différents niveaux spatiaux de la viticulture en Val de Loire, du niveau national au niveau parcellaire (e.g. parcelle de Chenin blanc).	17
Figure 6: L'étendue géographique des principales régions de production de vin (indiquées en noir) et des surfaces de la terre (indiquées en gris) où la température moyenne de la saison de croissance est située entre 12°C et 22°C pour la période de 1950 à 1999 (Jones et al. 2012).	19
Figure 7 : Les valeurs moyennes de : a) l'Indice de Winkler (<i>en anglais Winkler Index, WI</i>), b) l'Indice de Huglin (<i>en anglais Huglin Index, HI</i>), c) l'Indice de fraîcheurs des nuits (<i>en anglais Cold Night Index, CI</i>), d) l'Indice de sécheresse (<i>en anglais Dryness Index, DI</i>), calculées (les valeurs moyennes) à l'échelle Européenne pour la période de 1950 à 2009 (Santos et al. 2012).....	21
Figure 8 : Principaux facteurs caractérisant la variabilité spatiale du climat local (Quénol 2011).....	24
Figure 9 : Ecoulement gravitaire de l'air froid lors d'une inversion thermique (Jones et Hellman 2003)	25
Figure 10 : Représentation temporelle des différents facteurs qui agissent sur les variables écophysiologiques de la vigne et par la suite, sur la qualité et la typicité des vins produits....	29

Figure 11 : Illustration des dimensions spatiales et temporelles de la viticulture.	30
Figure 12 : Représentation simplifiée des différentes composantes du système climatique, leurs processus et interactions (GIEC 2007).	35
Figure 13 : Comparaison des changements globaux de température observés et ceux simulés en utilisant les forçages naturels et anthropiques (GIEC 2013).	36
Figure 14 : Evolution des concentrations atmosphériques du dioxyde de carbone (CO ₂), du méthane (CH ₄), de l'oxyde nitreux (N ₂ O) (GIEC 2007)	37
Figure 15 : a) Evolution observée des températures moyennes en surface entre 1901 et 2012 (GIEC 2013) et b) Carte des températures enregistrées en 2015, indexées par rapport aux plus chaudes et aux plus froides relevées depuis 1880.	38
Figure 16 : Tendances observées des précipitations annuelles mondiales entre 1901 et 2010, et entre 1951 et 2010 (GIEC 2013).	39
Figure 17 : Evolution des nombres de journées froides, chaudes et d'épisodes de précipitations abondantes à l'échelle planétaire (Zhang et al. 2011)	40
Figure 18 : Impacts observés du changement climatique en Europe (adaptée de Hansen et Cramer 2015).	40
Figure 19 : Relativement à la période de référence (1986-2005), les projections de la température mondiale selon les scénarios SRES (CMIP3) et les scénarios RCP (CMIP5) (Knutti et Sedláček 2012).	41
Figures 20 : Cartes des moyennes multimodèles CMIP5 pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 sur la période 2081–2100 pour: a) l'évolution de la température moyenne annuelle en surface, b) l'évolution moyenne en pourcentage de changements des précipitations moyennes annuelles (GIEC 2013).	42
Figure 21 : Cartographie des indices de Winkler et de Huglin en Europe pour la période de 1950 à 2009 (à gauche), et la différence entre les périodes de 1980-2009 et 1950-1979 (Santos et al. 2012).	45
Figure 22 : Evolution de l'indice de Huglin pour 4 stations météorologiques (a : Nantes, b : Angers, c : Saumur, d : Tours) dans le Val de Loire (France) au cours de la période 1950/60 à 2010 (Bonnefoy et al. 2012).	47
Figure 23 : Evolution de la date de vendange pour Cabernet franc en Bourgueil et pour Chenin blanc en Touraine, de 1970 à 2010 (Données : Laboratoire de Touraine)	47
Figure 24 : Série d'étapes successives lors d'une évaluation des impacts du changement climatiques sur la viticulture.	53
Figure 25 : A l'échelle de l'Europe, le changement attendu à l'horizon 2050 dans l'aptitude des régions pour la culture de la vigne selon le scénario RCP 4.5 (Hannah et al. 2013).	54
Figure 26 : Température moyenne durant la période de croissance de la vigne de 1971 à 1999 et de 2000 à 2012 à Rheingau, Allemagne ; en Bourgogne, France et dans la Vallée du Rhône, France (Van Leeuwen et al. 2013).	56

Figure 27 : Exemple d'atlas cartographique réalisé à l'échelle d'une appellation en Val de Loire, l'AOP Coteaux du Layon Premier Cru Chaume. La première carte représente la texture du sol en profondeur et la deuxième, le réservoir utilisable maximal en eau (RUM mm).	57
Figure 28 : Forte variabilité spatiale des conditions climatiques observée à l'échelle des vignobles. A gauche est l'exemple des variations des sommes des degrés-jours durant le cycle végétatif de la vigne (Madelin et al. 2010) et à droite, la variabilité des températures minimales le 5 mars 2009, lors d'un refroidissement nocturne dans les vignobles du Cap, Afrique du Sud (Bonnardot et al. 2011).....	58
Figure 29 : Modélisation de l'évolution du bilan hydrique dans les vignobles de l'AOP Coteaux du Layon Premier Cru Chaume du 1 avril au 30 juin 2014, selon trois parcelles dont la nature du sol (i.e. sol superficiel, profondeur moyenne, profond) et les pratiques viticoles dans les inter-rangs sont différentes (i.e. Enh. Tous IR = Enherbement dans tous les inter-rangs, Enh. 1/2 IR = Enherbement un rang sur deux, TS tous IR = Travail du sol dans tous les inter-rangs).	59
Figure 30 : Paysage du vignoble d'Anjou-Saumur (exemple : Savennières), longés par la Loire.	65
Figure 31: Diagrammes ombrothermiques d'Angers et de Montreuil-Bellay, calculés pour la période de 1981 à 2010 (Données : Météo France).....	66
Figure 32 : Pour la sous-région viticole d'Anjou-Saumur : a) Occupation des vignobles, b) Carte du relief, et c) Carte géologique avec le rencontre entre le Massif Armoricaïn (situé à l'ouest) et le Bassin Parisien (situé à l'est).	67
Figure 33: Methodological framework developed for the assessment of projected climate changes and their potential impacts on viticulture in Anjou-Saumur.	70
Figure 34: Heat requirements (as calculated from 1 March) for three red grapevine varieties, Gamay, Cabernet franc and Cabernet Sauvignon according to the Grapevine Flowering Veraison (GFV) model (<i>adapted from</i> Real et al. 2015).	72
Figure 35: a) Simulated annual average temperatures for Anjou-Saumur from 1976 to 2005, b) Compared to the recent past, the projected changes in average annual temperatures in the near (2011-2040), medium (2041-2070) and far future (2071-2100) under the low (RCP 2.6), intermediate (RCP 4.5) and high emission scenario (RCP 8.5).....	74
Figure 36: Relative to the recent past (RP), average annual and seasonal temperature anomalies (°C) in the near (NF), medium (MF) and far future (FF) for the grid cells encompassing the weather stations of Angers and Montreuil Bellay. Seasons are calculated over a three month period, Spring (MAM), Summer (JJA), Autumn (SON) and Winter (DJF).	75
Figure 37: a) Simulated annual rainfall totals for Anjou-Saumur from 1976 to 2005, b) Compared to the recent past, the projected changes in annual rainfall totals in the near (2011-2040), medium (2041-2070) and far future (2071-2100) under the low (RCP 2.6), intermediate (RCP 4.5) and high emission scenario (RCP 8.5).	76

Figure 38: Relative to the recent past (RP), total annual and seasonal rainfall anomalies (°C) in the near (NF), medium (MF) and far future (FF) for the grid cells encompassing the weather stations of Angers and Montreuil Bellay. Seasons are calculated over a three month period, Spring (MAM), Summer (JJA), Autumn (SON) and Winter (DJF).	77
Figure 39: Matrix scatterplot illustrating the linear trends in Growing Season Temperature index (GST, °C), Winkler Index (WI, °C units), Huglin Index (HI, °C units) and Biologically Effective Degree-Day index (BEDD, °C units) as a function of time (YEAR). The corresponding coefficient of determination, R^2 , for each linear model are also shown. The results are from the grid cell encompassing Montreuil-Belly.	78
Figure 40: From 2011 to 2100 and for the RCP 8.5: (a) Trends in flowering, veraison and maturity (200g/L) dates (Day of year, DOY) for Gamay, Cabernet franc and Cabernet Sauvignon; and relative to the recent past (1976-2005), the anomaly in (b) veraison-maturity length, (c) average temperature and (c) total rainfall.	81
Figure 41 : Aire géographique de l'AOP Coteaux du Layon et de l'AOP Saumur Champigny, situées dans la sous-région viticole d'Anjou-Saumur, France	89
Figure 42 : Photos des grappes de Chenin, prises dans l'AOP Coteaux du Layon, avec à gauche, les raisins passerillés, et à droite, les raisins botrytisés.....	90
Figure 43 : Paysage des vignobles des Coteaux du Layon et de Saumur Champigny.	91
Figure 44 : Contexte géomorphologique de a) les Coteaux du Layon (exemple du coteau de Chaume), et b) le Saumurois, dont fait partie l'AOP Saumur Champigny (Fanet 2008).	92
Figure 45: a) Geographical positions of the AOP Coteaux du Layon (<i>indicated in orange</i>) and AOP Saumur Champigny (<i>indicated in red</i>) in the Anjou-Saumur wine growing sub-region; and the experimental sites within b) AOP Coteaux du Layon and c) AOP Saumur Champigny.	94
Figure 46: Matrix scatterplot illustrating the linear relationships between growing season minimum (Tmin) and maximum (Tmax) temperatures of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny as a function of altitude (m), slope (%), North-South (cosine component) and East-West (sine component) direction. The corresponding coefficient of determination, R^2 , and Pearson correlation coefficient, r , for each linear model are also shown.	99
Figure 47: Box plots representing the temporal and spatial variability in average (Tm), minimum (Tmin) and maximum (Tmax) growing season temperatures for the data acquired from data loggers in Coteaux du Layon and Saumur Champigny, from 2013 to 2015.	100
Figure 48: Box plots representing the temporal and spatial variability in the Huglin Index, Cold night Index and Dryness Index for the data acquired from data loggers in Coteaux du Layon and Saumur Champigny, from 2013 to 2015.....	101
Figure 49: a) Spatial variability in minimum temperatures on 29 April 2013 in the experimental site of the AOP Coteaux du Layon, and b) according to an elevation profile of NNE to SSO.	103

Figure 50: a) Spatial variability in minimum temperatures on 29 April 2013 in the experimental site of the AOP Saumur Champigny, and b) according to an elevation profile of NE to SO.	104
Figure 51: Position of the studied vineyard plots in the two experimental sites of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny. Each plot is equipped with a temperature data logger. <i>See Figure 45 for the geographical location of the two study areas.</i>	108
Figure 52: Relative to the period from 1988 to 2015, the monthly average temperature and total rainfall anomalies from April to September in Beaulieu sur Layon and Saumur.....	110
Figure 53: Accumulation of Growing Degree Days (GDD, °C units) from April 1 to September 30, with a base temperature of 10°C (Winkler et al. 1974). The mean dates of Flowering (F) and Veraison (V) for the Coteaux du Layon (Chenin) and Saumur Champigny (Cabernet franc) in 2013 and 2015 are also indicated.....	112
Figure 54: Linear relationships between observed and predicted dates in flowering and veraison for Chenin in the AOP Coteaux du Layon and for Cabernet franc in Saumur Champigny. The predicted dates were modeled according to the Grapevine Flowering Veraison model (Parker et al. 2013).....	113
Figure 55: Linear relationships between the sugar content (g/L) and total acidity (g/L) five weeks post-veraison and the values of the Huglin Index (HI, °C units), Cold night Index (CI, °C), Dryness Index (DI, mm), Growing Degree Days index (GDD, °C units) and Growing season average temperature (GST, °C) from 2013 to 2015 for the AOP Coteaux du Layon and AOP Cabernet franc. The corresponding coefficient of determination, R^2 , for each linear model is shown.....	115
Figure 56: Growing season (April-September) average temperature and total rainfall in Beaulieu sur Layon and Saumur from 1988 to 2012 (Data source: Météo France).....	122
Figure 57: Temporal trends and causal factors identified for vine inter-row management practices.....	128
Figure 58: Based on the responses of winegrowers from Saumur Champigny, a) the priority of climate change adaptation strategies and b) its schematic representation in the short, medium and long term over the 21 st century.....	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evolution des dates de la vendange des principaux cépages cultivés en Anjou et Saumur (Source données : ATV 49, Ministère de l'Agriculture 1970)	48
Tableau 2 : Evolution de la composition des raisins pour des principaux cépages blancs et rouges cultivés dans le Val de Loire [Sources données : CA (44) ; ATV (49) ; Laboratoire de Touraine (37) ; SICAVAC (18)].	48
Table 3: Agroclimatic indices used to assess climate change impacts on viticulture (Tn, Tx and Tm refer to daily minimum, maximum and average temperatures, and P to daily rainfall totals).	72
Table 4: Differences between simulated and observed annual climate variables for the recent past reference period (1976-2005).	73
Table 5: Relative to the recent past (RP), the trends in viticultural indices in the near (NF), medium (MF) and far future (FF) for the grid cells encompassing the weather stations of Angers and Montreuil Bellay. Results for all three emission scenarios are illustrated (RCP 2.6, 4.5, 8.5).	79
Table 6: Modeled dates (i.e. in day of year, DOY) for flowering, veraison and maturity (200g/L) according to their heat requirements (Parker 2012; Parker et al. 2013). Results correspond to the grid cell dataset covering Montreuil-Bellay.	80
Table 7: Projected changes in average temperatures (Tm, °C) and rainfall totals (P, mm) for the flowering-veraison and veraison-maturity intervals for three red varieties. Results correspond to the grid cell dataset covering Montreuil-Bellay.	82
Tableau 8 : Principales caractéristiques environnementales et réglementaires de l'AOP Coteaux du Layon et de l'AOP Saumur Champigny.	92
Table 9: Geographical coordinates of the weather stations used in the mesoclimatic analysis of the AOP Coteaux du Layon and the AOP Saumur Champigny.	95
Table 10: Characteristics of climate variables and viticultural indices calculated for the weather stations in Beaulieu sur Layon and Saumur from 1988 to 2015.	97
Table 11: Spatial variability in climate variables and bioclimatic indices, calculated from the network of data loggers in the experimental sites of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny.	98
Table 12: Multiple linear regressions between observed minimum and maximum growing season temperatures from 2013 to 2015 and local environmental features.	100

Table 13: Spatial variability in modeled flowering and veraison dates (Day of year, DOY) in the experimental sites of the AOP Coteaux du Layon (for Chenin) and AOP Saumur Champigny (for Cabernet franc). Data were obtained from the data loggers in each study area.	102
Table 14: Observed dates (day of year, DOY) for flowering and veraison, as well as the estimated day of year when sugar contents of 170 g/L were attained in studied vineyard plots. In the AOP Coteaux du Layon, the variety is Chenin and in the AOP Saumur Champigny, it is Cabernet franc.	111
Table 15: Differences in berry composition five weeks post-veraison for Chenin in the AOP Coteaux du Layon and Cabernet franc in the AOP Saumur Champigny.	114
Table 16: Primary environmental and regulatory characteristics for the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny.	120
Table 17: Winegrowers' descriptions of wine quality along with the associated perceptions of seasonal climate characteristics and their impacts on grapevine behavior and wine production.	123
Table 18: Types of adaptive responses used by winegrowers to manage diverse climate conditions.	130

BIBLIOGRAPHIE

- Adams RM, Hurd B, Lenhart S, Leary N (1998) The Effects of Global Warming on Agriculture: An Interpretative Review. *J Clim Res* 11:19-30
- Adger WN (2006) Vulnerability. *Global Environmental Change* 16: 268-281
- Adger WN, Dessai S, Goulden M, Hulme M, Lorenzoni I et al. (2009) Are there social limits to adaptation. *Clim Change* 93: 335–354
- Alley RB, Marotzke J, Nordhaus WD, Overpeck JT, Peteet DM et al. (2003) Abrupt climate change. *Science* 299: 2005-2010
- Amerine, M.A., and A.J. Winkler (1944) Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia* 15: 493-675
- Anderson JD, Jones GV, Tait A, Hall A, Trought CT (2012) Analysis of viticulture region climate structure and suitability in New Zealand. *J Int Sci Vigne Vin* 46(3): 149-165
- Ashenfelter O, Storchmann K (2016) The economics of wine, weather, and climate change. *Review of Environmental Economics and Policy* 10: 25-46
- Asselin C, Barbeau G, Morlat R (2001) Approche de la composante climatique à diverses échelles dans le zonage viticole. *Bulletin de l'OIV*: 883-844
- Baciocco KA, Davis RE, Jones GV (2014) Climate and Bordeaux wine quality: identifying the key factors that differentiate vintages based on consensus rankings. *J Wine Res* 25:75-90
- Barbeau C, Barbeau G, Joannon A (2014) Analyzing the sensitivity of viticultural practices to weather variability in a climate change perspective: an application to workable-day modelling. *J Int Sci Vigne Vin* 48(2): 141–152
- Barbeau G, Morlat R, Asselin C, Jacquet A, Pinard C (1998) Comportement du cépage Cabernet Franc dans différentes terroirs du Val de Loire. Incidence de la précocité sur la composition de la vendange en année climatique normale (exemple de 1988). *J Int Sci Vigne Vin* 32(2):69–81
- Barbeau G, Rebretreau A, Bouvet M-H, Mège A, Cosneau M et al. (2001) Influence des composantes du terroir et du climat sur la surmaturation des baies de Chenin (*Vitis vinifera*). Relations avec l'analyse sensorielle des vins. *Revue Française d'Oenologie* 188: 22-28

- Barbeau G, Bournand S, Champenois R, Bouvet M-H, Blin A, Cosneau M (2003) Comportement de quatre cépages rouges du Val de Loire en fonction des variables climatiques. *J Int Sci Vigne Vin* 37 (4): 199-211
- Barbeau G (2007) Climat et vigne en moyenne vallée de la Loire, France. Congrès sur le climat et la viticulture. Saragosse, Espagne, 10-14 avril, seconde session “climat et terroir”: 96-101
- Barbeau G (2008) L’adaptation aux terroirs des cépages du Val de Loire. Paper presented at the Librandi Symposium, Ciro Marina, Calabre, Italy, 9-11 May 2008
- Barbeau G, Neethling E, Ollat N, Quénot H, Touzard JM (2015) Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *L’agronomie environnement et sociétés* 5(1): 67-75
- Battaglini A, Barbeau G, Bindi M, Badeck FW (2009) European winegrowers’ perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Reg Environ Change* 9: 61–73
- Belliveau S, Smit B, Bradshaw B (2006) Multiple exposures and dynamic vulnerability: evidence from the grape and wine industry in the Okanagan Valley, British Columbia Canada. *Glob Environ Ch* 20:1–21
- Beltrando G (2004) Les climats: processus, variabilité et risques. Armand Colin, Paris
- Bergqvist J, Dokoozlian N, Ebisuda N (2001) Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *Am J Enol Vitic* 52(1): 1–7
- Bindi M, Fibbi L, Gozzini B, Orlandini S, Miglietta F (1996) Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Clim Res* 7: 213-224
- Bindon K, Varela C, Kennedy J, Holt H, Herderich M (2013) Relationships between harvest time and wine composition in *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon 1. Grape and wine chemistry. *Food Chem* 138: 1696-1705
- Blanchet G (2015) 2014, année la plus chaude sur le globe. *La météorologie* 88: 2-3
- Blanco-Ward D, Garcia-Queijeiro JM, Jones GV (2007) Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. *Vitis* 46: 63-70
- Bloesch B, Viret O (2008) Stades phénologiques repères de la vigne. *Rev Suisse Vitic Arboric Hortic* 40(6): I-IV
- Bock A, Sparks T, Estrella N, Menzel A (2011) Changes in the phenology and composition of wine from Franconia Germany. *Clim Res* 50: 69–81
- Bodin F, Morlat R (2006) Characterization of viticultural terroirs using a simple field model based on soil depth I. Validation of the water supply regime, phenology and vine vigour, in the Anjou vineyard (France). *Plant Soil* 281:37–54

- Bonnardot V (1996) Le climat et la vigne en Bourgogne orientale. Climatologie appliquée et recherches d'indices climatiques pour la vigne en Côte de Beaune. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne
- Bonnardot V, Planchon O, Cautenet S (2005) Sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South-Western Cape and implications for the Stellenbosch wine-producing area. *Theor Appl Climatol*. doi 10.1007/s00704-004-0087-y
- Bonnardot V, Carey V, Madelin M, Cautenet S, Coetzee, Quénot H (2011) Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *J Int Sci Vigne Vin* 46(1): 1-13
- Bonnefoy C, Quénot H, Planchon O, Barbeau G (2010) Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* 14, <http://echogeo.revues.org/12146>
- Bonnefoy C, Quénot H, Bonnardot V, Barbeau G, Madelin M et al. (2012) Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *Int J Climatol* 33: 1849–1862
- Bonnefoy C (2013) Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique. Thèse de doctorat Université Rennes 2
- Boursiquot JM, Lacombe T, Bouquet A (1999) Une mémoire pour demain: le Domaine de Vassal, conservatoire génétique de la vigne. *Revue française d'œnologie*, n°177, juillet-août
- Branas J, Levadoux L, Bernon G (1946) *Elements de viticulture générale*. Ecole Nat Agric Montpellier
- Briche E, Beltrando G, Somot S, Quénot H (2014) Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEG-Climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region. *Clim Change* 123: 241-254
- Brooks N (2003) Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich. Available at: www.tyndall.ac.uk
- Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K, McCormick M, Frank D et al. (2011) 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science* 331: 578-582
- Buttrose MS, Hale CR, Kleiwer WM (1971) Effect of temperature on composition of Cabernet Sauvignon berries. *Am J Enol Vitic* 22:71-75
- Cabré MF, Quénot H, Nuñez M (2016) Regional climate change scenarios applied to viticultural zoning in Mendoza, Argentina. *Int J Biometeorol*. Doi: 10.1007/s00484-015-1126-3

- Cadot Y, Caillé S, Thiollot-Scholtus M, Samson A, Barbeau G, Cheynier V (2012) Characterisation of typicality for wines related to terroir by conceptual and by perceptual representations. An application to red wines from the Loire Valley. *Food Qual Prefer* 24(1): 48-58
- Calame F, Rochaix M, Simon JL (1977) Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites valaisans à différentes altitudes en vue de la delimitation de l'aire viticole. *Bulletin OIV*: 601-616
- Campbell-Clause JM (1998) Stomatal response of grapevines to wind. *Aust J Exp Agric* 38(1): 77-82
- Carbonneau A, Riou C, Guyon D, Riou J, Schneider C (1992) *Agrométéorologie de la vigne en France*. Office des Publications officielles des Communautés Européennes, Luxembourg
- Carbonneau A, Deloire A, Jaillard B (2007) *La vigne: physiologie, terroir, culture*. Ed. Dunod: Paris
- Carey VA, Barbeau G, Cadot Y, Conradie WJ, Vermeulen AK (2004) The implications of terroir for development of *Botrytis cinerea* into grey rot or noble on grapes of *Vitis vinifera* L.cv. Chenin blanc. Paper presented at the XXVIII World Congress of Vine and Wine and 84th General Assembly of the OIV, Vienna, Austria, 4-9 July 2004
- Carey VA, Saayman D, Archer E, Barbeau G, Wallace M (2008) Viticultural terroirs in Stellenbosch, South Africa. I. The identification of natural terroirs units. *J Int Sci Vigne Vin* 42(4):169-183
- Carmo Vasconcelos M, Greven M, Winefield C, Trought M, Raw V (2009) The flowering process of *Vitis vinifera*: a review. *Am J Enol Vitic* 60 (4): 411–434
- Castellarin SD, Gambetta GA, Hiroshi W, Krasnow MN, Cramer GR et al. (2015) Characterization of major ripening events during softening in grape: turgor, sugar accumulation, abscisic acid metabolism, colour development, and their relationship with growth. *J Exp Bot*. Doi: 10.1093/jxb/erv483
- Cautenet S, Bonnardot V, Madelin M, Quénot H (2014) Des méthodes de modélisation climatique adaptées aux échelles locales. In: Quénot H, *Changement climatique et terroirs viticoles*. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris.
- Cellier P (1996) La perception des terroirs du vignoble des Coteaux du Layon. 1er Colloque International "Les Terroirs Viticoles", Angers, 17-18 Juillet 1996
- Cook BI, Wolkovich EM (2016) Climate change decouples drought from early wine grape harvests in France. *NCLIMATE* 2960. doi: 10.1038
- Coombe BG (1987) Influence of temperature on composition and quality of grapes. *Acta Hort* 206:23-35
- Coombe BG, Dry PR (1988) *Viticulture. Pratiques*. Ed. Winetitles, Adelaide

- Coombe BG, McCarthy MG (2000) Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Aust J Grape Wine Res* 6:131–135
- Coulon C, Quénol H, Garcia De Cortázar Atauri I, Barbeau G (2009) La modélisation: un outil de pilotage du couple climat-vigne? *Revue Française d’Eonologie* 135: 15-22
- Coulon C, Ganenco A, Neethling E, Thiolllet-Scholtus M (2011) Méthode de typologie d’années climatiques de référence à l’usage de la modélisation. Application à la moyenne Vallée de la Loire. (in French). *Progrès Agric. Vitic* 17: 347–353
- Coulon-Leroy C, Morlat R, Barbeau G, Gary C, Thiolllet-Scholtus M (2012) The vine functioning pathway, a new conceptual representation. *Sustain Agric Rev* 11: 241–264
- Coulon-Leroy C, Neethling E, Cadot Y, Barbeau G (2014) L’eau: déterminant du terroir et de la typicité des produits. *Innovations Agronomiques* 38: 117-129
- Crane TA, Ronconi C, Hoogenboom G (2011) Adaptation to climate change and climate variability: the importance of understanding agriculture as performance. *NJAS Wageningen J Life Sci* 57: 179–185
- Cuccia C, Bois B, Richard Y, Parker AK, Garcia De Cortazar-Atauri I et al. (2014) Phenological model performance to warmer conditions: application to Pinot noir in Burgundy. *J Int Sci Vigne Vin* 48: 169-178
- Dami IE, Ennahli S, Zhang Y (2012) Assessment of winter injury in grape cultivars and pruning strategies following a freezing stress event. *Am J Enol Vitic* 63(1): 106-111
- De Blij HJ (1983) Wine: a geographic appreciation. *Progress in Physical Geography* 38(5): 674-684
- De Parcevaux S, Hubert L (2007) *Bioclimatologie. Concepts et applications*. Quae Editions, Versailles
- Déqué M (2007) Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* 57: 16-26
- Déqué M, Piedelievre JP (1995) High-Resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics* 11: 321-339
- Déqué M, Rowel DP, Lüthi D, Giorgi F, Christensen JH et al. (2007) An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Clim Change* 81: 53-70
- Dessai S, Hulme M (2004) Does climate adaptation policy need probabilities? *Clim Policy* 4: 107–128
- Destrac Irvine A, Barbeau G, De Resseguier L, Dufourcq T, Dumas V et al. (2016) Harmonising grapevine phenology recording for budburst and flowering as recommended by the perpheclim project. Paper presented at 19th International Meeting of Viticulture, Montpellier, France, June 2015

- Donaldson DR, Snyder RL, Elmore C, Gallagher S (1993) Weed control influences vineyard minimum temperatures. *Am J Enol Vitic* 44: 431–434
- Donat MG, Alexander LV (2012) The shifting probability distribution of global daytime and night-time temperatures. *Geophysical Research Letters*, 39, L14707
- Dougherty PH (2012) Introduction to the geographical study of viticulture and wine production. In: Dougherty PH, *The Geography of Wine: Regions, Terroir and Technique*. Ed. Springer Netherlands, Dordrecht. p. 3-36
- Downey MO, Dokoozlian NK, Krstic MP (2006) Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine: a review of recent research. *Am J Enol Vitic* 57(3): 257-268
- Dry PR (1988) Climate change and the Australian grape and wine industry. *Aust Grapegrower Winemaker* 300: 14-15
- Dry PR, Reed S, Potter G (1988) The effect of wind on the performance of Cabernet Franc grapevines. *Aust Grapegrower Winemaker* June, 19-21
- Dubreuil V (1994) La sécheresse dans la France de l'Ouest: Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA AVHRR. Thèse de l'Université Rennes 2
- Dubreuil V (1996) Synthèse géographique de la sécheresse dans les régions océaniques. *La Météorologie* 15:22–34
- Duchêne E, Schneider C (2005) Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agro Sustain Dev* 25:93–99
- Duchêne E, Huard F, Dumas V, Schneider C, Merdinoglu D (2010) The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Clim Res* 41: 193–204
- Dumas V, Lebon E, Morlat R (1997) Différenciations mésoclimatiques au sein du vignoble alsacien. *J Int Sci Vigne Vin* 31: 1-9
- Easingwood C, Lockshin L, Spawton A (2010) The drivers of wine regionality. *J Wine Res* 22(1): 19-33
- Elo S, Kyngäs H (2008) The qualitative content analysis process. *J Adv Nurs* 62: 107–115
- Failla O, Mariani L, Brancadoro L, Minelli R, Scienza A et al. (2004) Spatial distribution of solar radiation and its effects on vine phenology and grape ripening in an alpine environment. *Am J Enol Vitic* 55(2): 128-138
- Fanet (2008) *Les terroirs du vin*. Ed. Hachette, Paris
- Ford J, Smit B (2004) A framework for assessing the vulnerability of communities in the Canadian Arctic to risks associated with climate change. *Arctic* 57: 389–400
- Fraga H, Malheiro AC, Moutinho-Pereira J, Santos JA (2012) An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food Energy Secur* 1: 94–110

- Fraga H, Malheiro AC, Moutinho-Pereira J, Santos JA (2013). Future scenarios for viticultural zoning in Europe: ensemble projections and uncertainties. *Int. J. Biometeorol.* 57, 909–925
- Fraga H, Malheiro AC, Moutinho-Pereira J, Santos JA (2014) Climate factors driving wine production in the Portuguese Minho region. *Agricultural and Forest Meteorology* 185:26-36
- Fraga H, Santos JA, Malheiro AC, Oliveira AA, Moutinho-Pereira J, Jones GV (2015) Climatic suitability of Portuguese grapevine varieties and climate change adaptation. *Int J Climatol.* doi: 10.1002/joc.4325
- Fraga H, García de Cortázar Aauri I, Malheiro AC, Santos JA (2016) Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Glob Change Biol*, 22: 3774-3788
- Freeman BM, Kliewer WM, Stern P (1982) Influence of windbreaks and climatic region on diurnal fluctuation of leaf water potential, stomatal conductance, and leaf temperature of grapevines. *Am J Enol Vitic* 33: 233-236
- Fregoni M (2003) L'indice bioclimatico di qualità Fregoni. In: *Terroir, Zonazione Viticoltura*. M. Fregoni et al. (eds.). Ed. Phytoline, Piacenza, Italy. p. 115-127
- Füssel HM, Klein RJT (2006) Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Clim Change* 75:301–329
- Füssel HM (2007) Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches and key lessons. *Sustainabil Sci* 2:265–275
- Garcia de Cortázar-Aauri I, Brisson N, Gaudillere J-P (2009) Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Int J Biometeorol* 53: 317-326
- Garcia de Cartazar-Aauri I, Audergon JM, Bertuzzi P, Anger C, Bonhomme M, et al. (2015) PERPHECLIM ACCAF Project - Perennial fruit crops and forest phenology evolution facing climatic changes. Paper presented at the EGU General Assembly 2015, Vienna, Austria, 12-17 April 2005
- Gaudillère J-P, Van Leeuwen C, Ollat N (2002) Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *J Exp Bot* 53(369): 757-763
- Gibson C, Ostrom E, Ahn T-H (2000) The concept of scale and the human dimensions of the global change: a survey. *Ecol Econom* 32: 217-239
- GIEC (2007) Changements climatiques 2007 - Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume Uni et New York, États-Unis

- GIEC (2013) Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis
- GIEC (2014) Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, et al.]. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse
- Gioda A (2008) Les vignes de Lanzarote. In: Mollard E, Walter A, Agricultures singulières. (Ed). IRD éditions Paris. p. 311-313
- Gladstones J (1992) Viticulture and Environment. Winetitles, Adelaide
- Gladstones J (2004) Climate and Australian Viticulture. In: Viticulture Vol. 1. Resources. 2d ed. B. Coombe and P. Dry (eds.). Ed. Winetitles, Adelaide. p. 90-118
- Goulet E, Morlat R (2010) The use of surveys among wine growers in vineyards of the middle-Loire Valley (France), in relation to terroir studies. Land Use Policy 28: 770–782
- Graneheim UH, Lundman B (2004) Qualitative content analysis in nursing research: concepts, procedures and measures to achieve trustworthiness. Nurse Educ Today 24: 105–112
- Greer DH, Weston C (2010) Heat stress affects flowering, berry growth, sugar accumulation and photosynthesis of *Vitis vinifera* cv. Semillon grapevines grown in a controlled environment. Functional Plant Biology 37: 206-214
- Grifoni D, Mancini M, Maracchi G, Orlandini S, Zipoli G (2006) Analysis of Italian wine quality using freely available meteorological information. Am J Enol Vitic 57: 339–346
- Guyot G (1997) Climatologie de l'environnement. Masson, Paris
- Hadarits M, Smit B, Diaz H (2010) Adaptation in viticulture: a case study of producers in the Maule region of Chile. J Wine Res 21: 167-178
- Haeger JW, Storchmann K (2006) Prices of North American Pinot Noir wines: climate, craftsmanship, critics. Agricultural Economics 35:67-78
- Hall A, Jones GV (2010) Effect of potential atmospheric warming on temperature-based indices describing Australian winegrape growing conditions. Aust J Grape Wine Res 15: 97-119
- Hannah L, Roehrdanz PR, Ikegami M, Shepard AV, Shaw MR et al (2013) Climate change, wine, and conservation. Proc Natl Acad Sci U S A 110: 6907–6912

- Hansen J, Sato M, Ruedy R (2012) Perception of Climate Change. *Proc Natl Acad Sci USA* 109: E2415–2423
- Hansen G, Cramer W (2015) Global distribution of observed climate change impacts. *Nat Clim Change* 5: 182-185
- Hansen J, Sato M, Ruedy R R, Schmidt GA, Lo K (2016) Global Temperature in 2015. 19 January 2016. Communication available at <http://www.columbia.edu/~jeh1>
- Hansen G, Stone D (2016) Assessing the observed impact of anthropogenic climate change. *Nat Clim Change* 6: 532-537
- Hawkins E, Sutton R (2009) The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull Am Meteorol Soc*, August 2009: 1095-1107
- Hawkins E, Sutton R (2012) Time of emergence of climate signals. *Geophysical Research Letters* 2012, vol. 39, no 1
- Hayward D, Lewis N (2008) Regional dynamics in the globalising wine industry: the case of Marlborough, New Zealand. *Geogr J* 174(2): 124-137
- Herrmann M, Somot S, Calmanti S, Dubois C, Sevault F (2011) Representation of spatial and temporal variability of daily wind speed and of intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: impact of the regional climate model configuration. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11: 1983-2001
- Holland T, Smit B (2010) Climate change and the wine industry: current research themes and new directions. *J Wine Res* 21:125–136
- Holland T, Smit B (2013) Recent climate change in the Prince Edward Country winegrowing region, Ontario, Canada: implications for adaptation in a fledgling wine industry. *Reg Environ Change* 14: 1109-1121
- Howden SM, Soussana J-F, Tubiello FN, Chhetri N, Dunlop M, Meinke H (2007) Adapting agriculture to climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 104: 19691-19696
- Hsieh HF, Shannon SE (2005) Three approaches to qualitative content analysis. *Qual Health Res* 15:1277–1288
- Huglin, P (1978) Nouveau Mode d'Évaluation des Possibilités Héliothermiques d'un Milieu Viticole. *C.R. Acad. Agr. France* 64:1117-1126
- Huglin P, Schneider C (1998) *Biologie et écologie de la vigne*. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris
- Hunter JJ (2000) Implications of seasonal canopy management and growth compensation in grapevine. *S Afr J Enol Vitic* 21 (2): 81–91
- Hunter JJ, Archer E, Volschenk CG (2010) Vineyard management for environment valorisation. Paper presented at the VIIIth International Terroir Congress, Soave, Italy, 14-18 June 2010

- Hunter JJ, Bonnardot V (2011) Suitability of some climatic parameters for grapevine cultivation in South Africa, with focus on key physiological processes. *S Afr J Enol Vitic* 32(1):137-154
- Hunter JJ, Volschenk CG, Zorer R (2016) Vineyard row orientation of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz/101-14 Mgt: climatic profiles and vine physiological status. *Agricultural and Forest Meteorology* 228: 104-119
- Ingels CA, Scow KM, Whisson DA, Drenovsky RE (2005) Effects of cover crops on grapevines, yield, juice composition, soil microbial ecology and gopher activity. *Am J Enol Vitic* 56: 19-29
- Insee (1992) Le vin en 1991, une année marquée par le gel. Institut National de la Statistique et des Études Économiques. N°199 - Mai 1992
- InterLoire (2010) Poids économiques du vignoble du Maine-et-Loire. Disponible en ligne à: <http://www.vinsvaldeloire.fr>
- Jackson DI, Cherry NJ (1988) Prediction of a district's grape-ripening capacity using a latitude-temperature index (LTI). *Am J Enol Vitic* 39: 19-28
- Jackson DI, Lombard PB (1993) Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality, a review. *Am J Enol Vitic* 44:409-430
- Jackson RS (2008) Wine science: principles and applications. Ed. Academic Press, New York
- Jacquet A, Morlat R (1997) Caractérisation de la variabilité climatique des terroirs viticoles en val de Loire. Influence du paysage et des facteurs physiques du milieu. *Agronomie* 17: 465-480
- Jermini M, Blaise P, Gessler C (2010) Quantification of the influence of the downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on the compensatory capacities of *Vitis vinifera* 'Merlot' to limit the qualitative yield damage. *Vitis* 49(4): 153-160
- Joly D, Brossard T, Cardot H, Cavailhes J, Hilal M, Wavresky P (2010) Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeog: European Journal of Geography* (501): <http://cybergeog.revues.org/index23155.html>
- Jones GV, Davis RE (2000) Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *Am J Enol Vitic* 51:249-261
- Jones GV, Hellman E (2003) Site Assessment. In *Oregon Viticulture*. Hellman, E. (ed.), 5th Edition, Oregon State University Press, Corvallis, Oregon
- Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K (2005) Climate change and global wine quality. *Clim Change* 73: 319-343
- Jones GV (2006) Climate and terroir: Impacts of climate variability and change in wine. In *fine wine and terroir- The geoscience perspective*. Macqueen RW, Meinert LD (eds.), Geoscience Canada Reprint Series Number 9, Geological Association of Canada, St John's, Newfoundland

- Jones GV (2007) Climate change: observations, projections, and general implications for viticulture and wine production. *Practical Winery and Vineyard*, July/August: 44-64
- Jones GV, Moriondo M, Bois B, Hall A, Duff A (2009) Analysis of the spatial climate structure in viticulture regions worldwide. *Le bulletin de l'OIV* 82 (944, 945, 946): 507-518
- Jones GV, Duff A, Hall A, Myers J (2010) Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in the western United States. *Am J Enol Vitic* 61: 313-326
- Jones GV, Webb LB (2010) Climate change, viticulture, and wine: challenges and opportunities. *J Wine Res* 21: 103-106
- Jones GV, Reid R, Vilks A (2012) Climate, Grapes, and Wine: Structure and Suitability in a Variable and Changing Climate. In: Dougherty PH, *The Geography of Wine: Regions, Terroir and Technique*. Ed. Springer Netherlands, Dordrecht. p. 109-33
- Jones PD, Osborn TJ, Briffa KR (2001) The evolution of climate over the last millennium. *Science* 292: 662-667
- Jouzel J, Ouzeau G, Déqué M, Jouini M, Planton S, Vautard R (2014) Climat de la France au XXIème siècle. Volume 4. Scénario régionalisés: édition 2014 pour la metropole et les regions d'outre-mer. 64p
- Karl TR, Trenberth KE (2003) Modern global climate change. *Science* 302: 1719-1723
- Keller M (2010) Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Aust J Grape Wine Res* 16:56-69
- Keller M (2015) *The science of grapevines: anatomy and physiology*. Ed. Elsevier, Academic Press, London
- Kelly PM, Adger WN (2000) Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Clim Change* 47: 325-352
- Kennedy JA, Matthews MA, Waterhouse AL (2002) Effect of maturity and vine water status on grape skin and wine flavonoids. *Am J Enol Vitic* 53:268-274
- Kenny GJ, Harrison PA (1992) The effects of climate variability and change on grape suitability in Europe. *J Wine Res* 3:163-183
- Kenny GJ, Shao J (1992) An assessment of a latitude-temperature index for predicting climate suitability for grapes in Europe. *J Hortic Sci* 67(2): 239-246
- Klein RJT, Nicholls RJ, Mimura N (1999) Coastal adaptation to climate change: can the IPCC guidelines be applied? *Mitig Adapt Strat Global Change* 4: 239-252
- Klein RJT, Schipper ELF, Dessai S (2005) Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions. *Environ Sci Policy* 8: 579-588

- Knutti R, Sedlacek J (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nat Clim Change* 1716: 1-5. doi: 10.1038/NCLIMATE1716
- Koufos G, Mavromatis T, Koundouras S, Fyllas NM, Jones GV (2014) Viticulture-climate relationships in Greece: the impacts of recent climate trends on harvest date variation. *Int J Climatol* 34: 1445–1459
- Koundouras S, Van Leeuwen C, Seguin G, Glories Y (1999) Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, cépage Saint-Georges, 1997). *J Int Sci Vigne Vin* 33(4): 149-160
- Koundouras S, Marinos V, Gkoulioti A, Kotseridis Y, Van Leeuwen C (2006) Influence of vineyard location and vine water status on fruit maturation of nonirrigated cv. Agiorgitiko (*Vitis Vinifera* L.). Effects on wine phenolic and aroma components. *J Agric Food Chem* 54: 5077-5086
- Lacombe T (2015) Etude à grande échelle de la généalogie des cépages. *Revue des œnologues et des techniques vitivinicoles et œnologiques*, n°157, novembre
- Le Roux R, Neethling E, De Resseguier L, Barbeau G, Van Leeuwen C, Quénot H (2016) Nested scale approach to characterize climate aspect of vineyard terroirs in a context of climate change. Presented at the Climwine Sustainable grape and wine production in the context of climate change. Bordeaux, April 10-13, 2016
- Lémond J, Dandin P, Planton S, Vautard R, Pagé C et al. (2011) DRIAS: a step toward climate services in France. *Adv Sci Res* 6: 179-186
- Lereboullet AL, Beltrando G, Bardsley DK (2013) Socio-ecological adaptation to climate change: a comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agric Ecosyst Environ* 164: 273–285
- Leys C, Ley C, Klein O, Bernard P, Licata L (2013) Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *J Exp Soc Psychol* 49: 764-766
- Lorenz DH, Eichhorn KW, Bleiholder H, Klose R, Meier U, Weber E (1995) Growth Stages of the Grapevine: Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). Codes and descriptions according to the extended BBCH scale. *Aust J Grape Wine Res* 1:100-103
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, Blunier T, Barnola J-M et al. (2008) High resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature* 453: 379-382
- Madelin M (2004) L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne: Modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air. Thèse de doctorat Université Paris 7

- Madelin M, Beltrando G (2005) Spatial interpolation-based mapping of the spring frost hazard in the Champagne vineyards. *Met Apps* 12: 51–56
- Madelin M, Bois B, Quénot H (2010) Variabilités spatiale des températures et des stades phénologiques de la vigne à l'échelle des terroirs de la montagne de Corton (Bourgogne). Présenté au 22ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, 349-354
- Makra L, Vitanyi B, Gal A, Mika J, Matyasovszky I, Hirsch T (2009) Wine quantity and quality variations in relation to climatic factors in the Tokaj (Hungary) Winegrowing Region. *Am J Enol Vitic* 60(3):312-321
- Malheiro AC, Santos JA, Fraga H, Pinto JG (2010) Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Clim Res* 43: 163–177
- Mann ME (2002a) Little ice age Volume 1, The earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change. In: MacCracken MC et Perry JS, *Encyclopedia of global environmental change*. (eds.). John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. p. 504-509
- Mann ME (2002b) Medieval climatic optimum Volume 1, The earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change. In: MacCracken MC et Perry JS, *Encyclopedia of global environmental change*. (eds.). John Wiley & Sons, Ltd, Chichester. p. 514-516
- Mann ME, Zhang Z, Hughes MK, Bradley RS, Miller SK et al. (2008) Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *PNAS* 205(36): 13252-13257
- Marais J, Hunter JJ, Haasbroek PD (1999) Effect of microclimate, season and region on Sauvignon blanc grape composition and wine quality. *S Afr J Enol Vitic* 20: 19–30
- Martin SR, Dunn GM (2000) Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of *Vitis vinifera* L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. *Aust J Grape Wine Res* –6: 31-39
- Matthews MA, Anderson MM (1988) Fruit ripening in *Vitis vinifera* L.: responses to seasonal water deficits. *Am J Enol Vitic* 39(4): 313-320
- Matthews MA, Ishii R, Anderson MM, O'Mahony M (1990) Dependence of wine sensory attributes on vine water status. *J Sci Food Agric* 51(3):321–335
- Meehl GA, Goddard L, Murphy J, Stouffer RJ, Boer G et al. (2009) Decadal prediction: can it be skillful. *Bull Am Meteorol Soc* 90: 1467-1485
- Meehl GA, Hu A, Tebaldi C, Arblaster JM, Washington WM et al. (2012) Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus sealevel rise. *Nat Clim Change* 2: 576–580

- Meinshausen, M, Smith SJ, Calvin K, Daniel JS, Kainuma MLT et al. (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim Change* 109, 213–241
- Metzger MJ, Rounsevell MDA (2011) A need for planned adaptation to climate change in the wine industry. *Environ Res Lett* 6:031001
- Miguel-Tabares JA, Martin-Luis B, Carrillo-Lopez M, Diaz-Diaz E, Darias-Martin J (2002) Effect of altitude on the wine-making potential of listan negro and ruby carbernet cultivars in the south of Tenerife Island. *J Int Sci Vigne Vin* 36(4): 185-194
- Ministère de l'agriculture (1970) Direction des productions, des marchés et des échanges extérieurs. Etude des chargés de main d'oeuvre d'équipement mécanique dans les exploitations viticoles du Val de Loire, 59 pages
- Moisselin J-M, Schneider M, Canellas C, Mestre O (2002) Les changements climatiques en France au XXème siècle: étude des longues series homogénéisées de données de températures et de précipitations. *La météorologie* 38: 45-56
- Molitor D, Junk J, Evers D, Hoffmann L, Beyer M (2014) A high-resolution cumulative degree day-based model to simulate phenological development of grapevine. *Am J Enol Vitic* 65(1): 72-80
- Moncur WM, Rattigan K, MacKenzie DH, Mc Intyre GN (1989) Base temperature for budbreak and leaf appearance of grapevines. *Am J Enol Vitic* 40:21-26.
- Montes C, Perez-Quezada JF, Peña-Neira A, Tonietto J (2012) Climatic potential for viticulture in Central Chile. *Aust J Grape Wine Res* 18: 20-28
- Mora C, Fraizier AG, Longman RJ, Dacks RS, Walton MM et al (2013) The projected timing of climate departure from recent variability. *Nature*, 502:183-188
- Mori K, Goto-Yamamoto N, Kitayama M, Hashizume K (2007) Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of Experimental Botany* 58(8): 1935-1945
- Moriondo M, Jones GV, Bois B, Dibari C, Ferrise R et al. (2013) Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Clim Change* 119 : 825-839
- Morlat R, Hardy P (1986) Résultats concernant les variations de précocité de la vigne dans le Val de Loire. Importance du pédoclimat thermique. Présenté au IIIe Symposium International de Physiologie de la Vigne. Bordeaux, 332-338
- Morlat R, Penavayre M, Jacquet A, Asselin C, Lemaitre C (1992) Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et la photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990): consequence sur la maturation du raisin. *J Int Sci Vigne Vin* 26(4): 197-220
- Morlat R, Jacquet A (1993) The soil effects on the grapevine root system in several vineyards of the Loire valley (France). *Vitis* 32: 35-42

- Morlat R, Jacquet A, Asselin C (1997) Variabilité de la précocité de la vigne en Val de Loire: Rôle du terroir et du millésime, conséquences sur la composition de la baie, juillet août 1997. *Revue française d'oenologie* 165: 11-22
- Morlat R (2001) Terroirs viticoles: étude et valorisation. Editions Oenoplurimédia, Chaintré
- Morlat R, Jacquet A (2003) Grapevine root system and soil characteristics in a vineyard maintained long-term with or without interrow sward. *Am J Enol Vitic* 54(1):1-7
- Morlat R (2010) *Traité de viticulture de terroir*. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris
- Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK et al. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463: 747-756
- Mozell MR, Thach L (2014) The impact of climate change on the global wine industry: challenges & solutions. *Wine Econ Policy* <http://dx.doi.org/10.1016/j.wep.2014.08.001>
- Mullins MG, Bouquet A, Williams LE (1992) *Biology of the grapevine*. Cambridge University Press, Great Britain
- Myles S, Boyko AR, Owens CL, Brown PJ, Grassi F, et al. (2011) Genetic structure and domestication history of the grape. *PNAS* 108: 3530-3535
- Neethling E, Barbeau G, Quenol H, Bonnefoy C (2011) Evolution du climat et de la composition des raisins des principaux cépages cultivés dans le val de Loire. *Climatologie* 8: 77-90
- Neethling E, Barbeau G, Bonnefoy C, Quénel H (2012) Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Clim Res* 53: 89-101
- Nendel C (2010) Grapevine bud break prediction for cool winter climates. *Int J Biometeorol* 54: 231-241
- Newman JL (1986) Vines, wines, and regional identity in the finger lakes region. *Geographical Review* 76(3): 301-316
- Nicholas KA, Durham WH (2012) Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: insights from winegrowing in Northern California. *Glob Environ Ch* 22: 483-494
- O'Brien K, Sygna L, Haugen JE (2004) Vulnerable or resilient? A multi-scale assessment of climate impacts and vulnerability in Norway. *Clim. Change* 64:193-225
- O'Brien K, Eriksen S, Nygaard LP, Schjolden A (2007) Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses. *Clim Policy* 7: 73-88
- O'Connell NV, Snyder RL (1999) Cover crops, mulch lower night temperatures in citrus. *Calif Agric* 53: 37-40
- OIV, International Organisation of Vine and Wine (2015) Report on the world vitivinicultural situation. Retrieved from: http://www.oiv.int/oiv/info/en-Bilan_OIV_Mainz_2015

- Ojeda H, Andary C, Kraeva E, Carbonneau A, Deloire A (2002) Influence of pre- and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz. *Am J Enol Vitic* 53(4): 261-267
- Oke TR (1987) *Boundary layer climate*. Methuen & Co, London
- Ollat N, Touzard JM (2014) Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry. *J Int Sci Vigne Vin*. Special issue climate change: 77-80
- Ollat N, Touzard JM, Van Leeuwen C (2016) Climate Change Impacts and Adaptations: New Challenges for the Wine Industry. *Journal of Wine Economics* 11: 139-149
- Orduna RM (2010) Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res Int* 43:1844–1855
- Orlandini S, Marta AD, Mancini M (2006) The agroclimatic analysis at farm scale. *Meteorol Appl*: 87-93
- Orlandini S, Bindi M, Howden M (2009) Plant biometeorology and adaptation. In: Ebi KL, Burton I, McGregor GR (eds.) *Biometeorology for adaptation to climate variability and change*. Ed. Springer, Dordrecht, pp 107–129
- Parker AK, (2012) *Modelling phenology and maturation of the grapevine Vitis vinifera L.: varietal differences and the role of leaf area to fruit weight ration manipulations*. Thèse de doctorat Lincoln University
- Parker A, Garcia de Cortázar I, Chuine I, Barbeau G, Bois B et al (2013) Classification of varieties for their timing of flowering and véraison using a modelling approach: a case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L. *Agric For Meteorol* 180:249–264
- Peters GP, Andrew RM, Boden T, Canadell JG, Ciais P et al. (2013) The challenge to keep global warming below 2 degrees C. *Nat Clim Change* 3: 4-6
- Petit JR, Jouzel J, Raynaud D, Barkov NI, Barnola JM et al. (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399: 429-436
- Pieri P (2010) Changement climatique et culture de la vigne: l'essentiel des impacts. In, *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces*. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010), Ademe ed, pp. 213-223.
- Poling EB (2008) Spring cold injury to winegrapes and protection strategies and methods. *Hortscience* 43:1652–1662
- Quénol H (2002) *Modifications climatiques aux échelles fines générées par un ouvrage linéaire en remblai: l'exemple de l'incidence de la ligne à grande vitesse du TGV Méditerranée sur le gel printanier et l'écoulement du mistral dans la basse vallée de la Durance*. Thèse de l'Université Lille 1

- Quénol H, Maciel A, Monteiro A, Beltrando G (2004) Mesures climatiques aux échelles fines (météorologiques et agronomiques) et variabilité spatiale du gel printanier dans le vignoble de Vinho Verde. *Norois* 193:117–132
- Quénol H, Planchon O, Wahl L (2008) Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège* 51:127–137
- Quénol H (2011) Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique. Habilitation à Dirigée des Recherches. Université Rennes 2
- Quénol H (2014) Changement climatique et terroirs viticoles. Lavoisier Tec et Doc, Paris
- Quénol H, Bonnardot V (2014) A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the « TERADCLIM » project. *J Sci Vigne Vin, Special Issue Laccave*: 25-34
- Ramos MC, Jones GV, Martínez-Casasnovas JA (2008) Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. *Clim Res* 38: 1–15
- Real A, Borges J, Sarsfield Cabral J, Jones GV (2015) Partitioning the grapevine growing season in the Douro Valley of Portugal: accumulated heat better than calendar dates. *Int J Biometeorol* 59: 1045-1059
- Reid S, Smit B, Caldwell W, Belliveau S (2007) Vulnerability and adaptation to climate change in Ontario agriculture. *Mitig Adapt Strateg Global Change* 12: 609–637
- Reynier A (2007) Manuel de viticulture. Ed. Lavoisier Tec et Doc, Paris
- Reynolds AG, Vanden Heuvel JE (2006) Influence of grapevine training systems on vine growth and fruit composition: a review. *Am J Enol Vitic* 60: 251-268
- Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V et al. (2011) RCP8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Clim Chang* 109: 33–57
- Rial JA, Pielke SRRA, Beniston M, Claussen M, Canadell J et al. (2004) *Clim Change* 65: 11-38
- Ribèreau-Gayon P, Dubourdieu D, Donèche B, Lonvaud A (2006) Handbook of Enology Volume 1, The Microbiology of Wine and Vinifications 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England
- Ricklefs R, Miller G (2005) Ecologie. De Boeck, Bruxelles
- Riou C, Becker N, Sotes Ruiz V, Gomez-Miguel V, Carbonneau A et al. (1994) Le déterminisme climatique de la maturation du raisin: application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne. Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, Luxembourg
- Rochard J, Pérard J (2012) Paysages viticoles de climats extrêmes. *Revue des œnologues* 145: 11-15

- Rochard J, Zaba S, Chevre C (2010) Evolution du climat et viticulture analyse de la perception des professionnels et des experts. Paper presented at the 33rd World Congress of Vine and Wine, Georgia, Tbilisi, 20-27 June 2010
- Rogelj J, Hare W, Lowe J, Van Vuuren DP, Riahi K et al. (2011) Emission pathways consistent with a 2°C global temperature limit. *Nat Clim Change* 1: 413-418
- Rogelj J, Meinshausen M, Knutti R (2012) Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature* 2: 248-253
- Rosenzweig C, Tubiello FN (2007) Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. *Mitig Adapt Strat Glob Change* 12: 855-873
- Rubin HJ, Rubin LS (2005) Qualitative interviewing: the art of hearing data. SAGE Publications, California
- Ruddiman WF (2005a) How did humans first alter global climate. *Sci Am* 292(3): 34-41
- Ruddiman WF (2005b) The early anthropogenic hypothesis a year later. *Clim Chang* 69: 427-434
- Ruffner HP, Hawker JS, Hale CR (1976) Temperature and enzymic control of malate metabolism in berries of *Vitis vinifera*. *Phytochemistry* 15: 1877-1880
- Ruml M, Vukovic A, Vujadinovic M, Djurdjevic V, Rankovic-Vasic Z et al. (2012) On the use of regional climate models: Implications of climate change for viticulture in Serbia. *Agriculture and Forest Meteorology* 158-159: 53-62
- Sadras VO, Soar CJ, Petrie PR (2007) Quantification of time trends in vintage scores and their variability for major wine regions of Australia. *Aust J Grape Wine Res* 13: 117-123
- Salette J (2006) Agrément des vins d'appellations et typicité. *Le vigneron du Val de Loire*, 246 (26 octobre), 17
- Santos JA, Malheiro AC, Pinto JG, Jones GV (2012) Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Clim Res* 51: 89-103
- Schultz HR (2000) Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Aust J Grape Wine Res* 6: 2-12
- Schultz HR, Jones GV (2010) Climate induced historic and future changes in viticulture. *J Wine Res* 21:137–145
- Schultz HR, Stoll M (2010) Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations. *Aust J Grape Wine Res* 16: 4-24
- Seguin B, Garcia de Cortazar I (2004) Climate warming: consequences for viticulture and the notion of 'terroirs' in Europe. *Acta Horticulturae* 689: 61–71
- Shaw TB (2012) A climatic analysis of wine regions growing pinot noir. *J Wine Res* 23(3): 203-228

- Smart RE, Dry PR (1980) A climatic classification for Australian viticultural regions. *Aust Grapegrow Winemak* 17: 8-16
- Smart RE, Smith SM, Winchester V (1988) Light quality and quantity effects on fruit ripening for Cabernet Sauvignon. *Am J Enol Vitic* 39(3): 250-258
- Smart RE (1989) Climate change and the New Zealand wine industry. Prospects for the third millenium. *Wine Ind J*. Feburary 8-11
- Smit B, Burton I, Klein RJT, Street R (1999) The science of adaptation: a framework for assessment. *Mitig Adapt Strat Global Change* 4:199–213
- Smit B, Skinner M (2002) Adaptation options in Canadian agriculture to climate change. *Mitig Adapt Strateg Global Change* 7:85–114
- Smit B, Wandel J (2006) Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Glob Environ Change* 16: 282–292
- Soar CJ, Sadras VO, Petrie PR (2008) Climate drivers of red wine quality in four contrasting Australian wine regions. *Aust J Grape Wine Res* 14:78-90
- Solomon A, Goddard L, Kumar A, Carton J, Deser C et al. (2011) Distinguishing the roles of natural and anthropogenically forced decadal climate variability: Implications for prediction. *Bull Am Meteorol Soc* 92(2):141-156
- Spayd SE, Tarara JM, Mee DL, Ferguson JC (2002) Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. *Am J Enol Vitic* 53(3):171-182
- Spellman G (1999) Wine, weather and climate. *Weather* 54(8): 230-239
- Sturman A, Quénot H (2013) Changes in atmospheric circulation and temperature trends in major vineyard regions of New Zealand. *Int J Climatol* 33: 2609–2621
- Tarara JM, Lee J, Spayd SE, Scagel CF (2008) Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. *Am J Enol Vitic* 59(3): 235-247
- Tesic D, Woolley DJ, Hewett EW, Martin DJ (2001) Environmental effects on cv Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) grown in Hawke's Bay, New Zealand: development of a site index. *Aust J Grape Wine Res* 8: 27-35
- Tesic D, Keller M, Hutton RJ (2007) Influence of vineyard floor management practices on grapevine vegetative growth, yield and fruit composition. *Am J Enol Vitic* 58: 1–11
- This P, Lacombe T, Thomas MR (2006) Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *Trends Genet* 22:511-519
- Thomson AM, Calvin KV, Smith SJ, Kyle GP, Volke A et al. (2011) RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Clim Chang* 109: 77–94

- Tol RSJ (2005) Adaptation and mitigation: trade-offs in substance and methods. *Environ Sci Policy* 8:572–578
- Tomasi D, Jones GV, Giust M, Lovat L, Gaiotti F (2011) Grapevine phenology and climate change: relationships and trends in the Veneto region of Italy for 1964–2009. *Am J Enol Vitic* 62: 329–339
- Tonietto J (1999) Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mesoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: méthodologie de caractérisation. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier
- Tonietto J, Carbonneau A (2004) A multicriteria climatic classification system for grapegrowing regions worldwide. *Agr Forest Meteorol* 124: 81–97
- Trenberth KE, Stepaniak DP (2004) The flow of energy through the earth's climate system. *Q J R Meteorol Soc* 130(603): 2677-2701
- Trenberth KE, Fasullo JT, Kiehl J (2009) Earth's global energy budget. *Bull Am Meteorol Soc* 90: 311-323
- Trenberth KE, Fasullo JT, Balmaseda MA (2014) Earth's energy imbalance. *Bull Am Meteorol Soc* 27: 3129-3144
- Ulbade JM, Sort X, Poch RM, Porta M (2007) Influence of edapho-climatic factors on grape quality in Conca de Barberà vineyard (Catalonia, Spain). *J Int Sci Vigne Vin* 41(1):33-41
- Van Leeuwen C, Friant P, Xavier C, Tregoat O, Koundouras S, Dubourdieu D (2004) Influence of climate, soil, and cultivar on terroir. *Am J Enol Vitic* 55:207-217
- Van Leeuwen C, Trégoat O, Choné X, Bois B, Pernet D, Gaudillère JP (2009) Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be accessed for vineyard management purposes. *J Int Sci Vigne Vin* 43(3) :121–134
- Van Leeuwen C, Seguin G (2006) The concept of terroir in viticulture. *J Wine Res* 17:1-10
- Van Leeuwen C, Schultz H, Garcia de Cortazar-Atauri I, Duchêne E, Ollat N et al. (2013) Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine producing areas by 2050. *Proc Natl Acad Sci USA, PNAS*, 110(33): E3051–E3052
- Van Leeuwen C, Destrac A, Darriet P, Pons A, Allamy L (2016) Modified grape composition under Climate Change conditions requires adaptations in the vineyard. Presented at the Climwine Sustainable grape and wine production in the context of climate change. Bordeaux, April 10-13, 2016
- Van Leeuwen C, Darriet P (2016) The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics* 11(1): 150-167

- Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim Change* 109: 5-31
- Van Vuuren DP, Stehfest E, Den Elzen MGJ, Kram T, Van Vliet J et al. (2011) RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Clim Chang* 109: 95-111
- Vaudour E (2002) The quality of grapes and wine in relation to geography: Notions of terroir at various scales. *J Wine Res* 13(2): 117-141
- Vaudour E, Shaw AB (2005) A worldwide perspective on viticultural zoning. *S Afr J Enol Vitic* 26(2): 106-115
- Vautard RT, Noel L, Li M, Vrac E, Martin P et al. (2013) Climate variability and trends in downscaled high-resolution simulations and projections over Metropolitan France. *Clim Dyn* 41: 1419-1437
- Vidal JP, Martin E, Franchistéguy L, Baillon M, Soubeyroux JM (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int J Climatol* 30: 1627-1644
- Vivier MA, Pretorius IS (2000) Genetic Improvement of Grapevine: Tailoring Grape Varieties for the Third Millennium - A Review. *S Afr J Enol Vitic* 21:5-26
- Von Schuckmann K, Palmer MD, Trenberth KE, Cazenave A, Chambers D et al. (2016) An imperative to monitor Earth's energy imbalance. *Nat Clim Change* 6: 138-144
- Wang E, Engel T (1988) Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems* 58(1): 1-24
- Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR (2007) Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Aust J Grape Wine Res* 13: 165-175
- Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR (2008) Climate change and winegrape quality. Australia. *Clim Res* 36: 99-111
- Webb LB, Whiting J, Watt A, Hill T, Wigg F et al (2010) Managing grapevines through severe heat: a survey of growers after the 2009 summer heatwave in South-eastern Australia. *J Wine Res* 21:147-165
- Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR (2011) Observed trends in winegrape maturity in Australia. *Glob Chang Biol* 17:2707-2719
- Webb LB, Whetton PH, Bhend J, Darbyshire R, Briggs PR, Barlow EWR (2012) Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices. *Nat Clim Change* 2: 259-264
- White MA, Whalen P, Jones GV (2009) Land and wine. *Nat Geosci* 2: 82-84
- Whiteman CD (2000) Mountain meteorology: fundamentals and applications. Oxford University Press, New York

- Williams MG, Magarey PA, Sivasithamparam K (2007) Effect of temperature and light intensity on early infection behaviour of a Western Australian isolate of *Plasmopara viticola*, the downy mildew pathogen of grapevine. *Pathology* 36(4): 325-331
- Willis KJ, Whittaker RJ (2002) Species diversity-scale matters. *Science* 295: 1245-1248
- Winkler AJ, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA (1974) *General Viticulture*. Ed. University of California Press, Berkeley
- Wu J, David J (2002) A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling* 153: 7-26
- Wu J (2013) Hierarchy theory: an overview. In: Rozzi R et al. (eds.). *Linking ecology and ethics for a changing world: values, philosophy, and action, ecology and ethics*. p 281-301
- Zhang X, Alexander L, Hegerl GC, Jones P, Klein-Tank A et al. (2011) Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Clim Change*. doi: 10.1002/wcc.147

ANNEXES

Annexe 1 : Les principaux indices agroclimatiques appliqués en viticulture

Indice ¹	Méthode de calcul pour l'hémisphère nord	Classes Climatiques	Références
Basé sur l'effet cumulatif de la température de l'air journalière²			
Indice de Winkler (WI, unité °C)	$\sum_{01/04}^{31/10} \text{Max} \left[\frac{(Tx+Tn)}{2} - 10, 0 \right]$	Trop froid < 850 Région Ia 850 à 1111 Région Ib 1111 à 1389 Région II 1389 à 1667 Région III 1667 à 1944 Région IV 1944 à 2222 Région V 2222 à 2700 Trop chaud > 2700	Amerine et Winkler 1944, Winkler et al. 1974, Jones et al. 2010, Hall et Jones 2010
Indice de Huglin (HI, unité °C)	$\sum_{01/04}^{30/09} \text{Max} \left[\frac{(Tm-10)+(Tx-10)}{2}, 0 \right] k *$	Trop froid < 1200 Très frais 1200 à 1500 Frais 1500 à 1800 Tempéré 1800 à 2100 Tempéré chaud 2100 à 2400 Chaud 2400 à 2700 Très chaud 2700 à 3000 Trop chaud > 3000	Huglin 1978. Huglin et Schneider 1998. Tonietto et Carbonneau 2004
Indice des degrés-jours biologiquement efficaces (BEDD, unité °C)	$\sum_{01/04}^{31/10} \text{Min} \left[\max \left(\frac{[Tx+Tn]}{2} - 10, 0 \right) k + TR^*, 9 \right]$	Trop froid < 1000 Très frais 1000 à 1200 Frais 1200 à 1400 Tempéré 1400 à 1600 Tempéré chaud 1600 à 1800 Chaud 1800 à 2000 Très chaud 2000 à 2200 Trop chaud > 2200	Gladstones 1992. Jones et al. 2010. Hall et Jones 2010
Basé sur la température de l'air journalière²			
Indice de température moyenne de saison (GST, °C)	$\sum_{01/04}^{31/10} \left[\frac{(Tx+Tn)}{2} \right] / (n=214)$	Trop froid < 13 Frais 13 à 15 Tempéré 15 à 17 Tempéré chaud 17 à 19 Chaud 19 à 21 Très chaud 21 à 24 Trop chaud > 24	Jones et al. 2005. Jones et al. 2010. Hall et Jones 2010
Indice de fraîcheur des nuits (CI, °C)	$\sum_{01/09}^{30/09} [Tn] / (n=30)$	Nuits très fraîches < 12 Nuits fraîches 12 à 14 Nuits tempérées 14 à 18 À nuits chaudes > 18	Tonietto 1999. Tonietto et Carbonneau 2004
Basé sur les paramètres climatiques mensuels³			
Indice hydrothermique de Branas (Hyl, °C mm)	$\sum_{\text{Avr}}^{\text{Aug}} [T \times P]$	Risque faible < 2500 Risque modéré 2500 à 5100 Risque élevé 5100 à 7500 Risque très élevé > 7500	Branas et al. 1946. Blanco-Ward et al. 2007. Santos et al. 2012
Indice de sécheresse (DI, mm)	$\sum_{\text{Avr}}^{\text{Sept}} [Wo + P - Tv - Es]$	Humide > 150 Subhumide 50 à 150 Sécheresse modérée -100 à 50 Sécheresse forte < -100	Riou et al. 1994. Tonietto et Carbonneau 2004

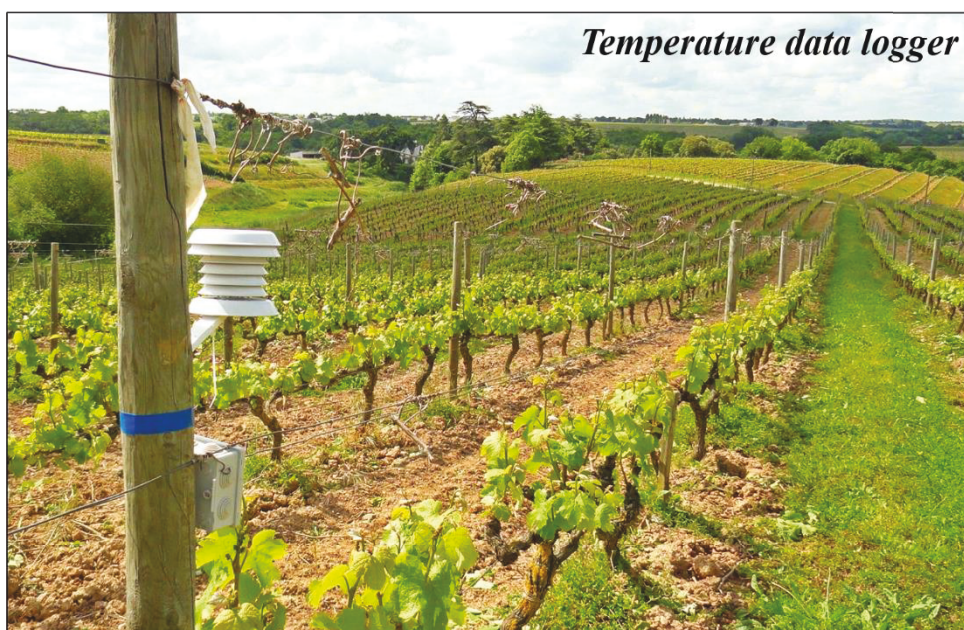
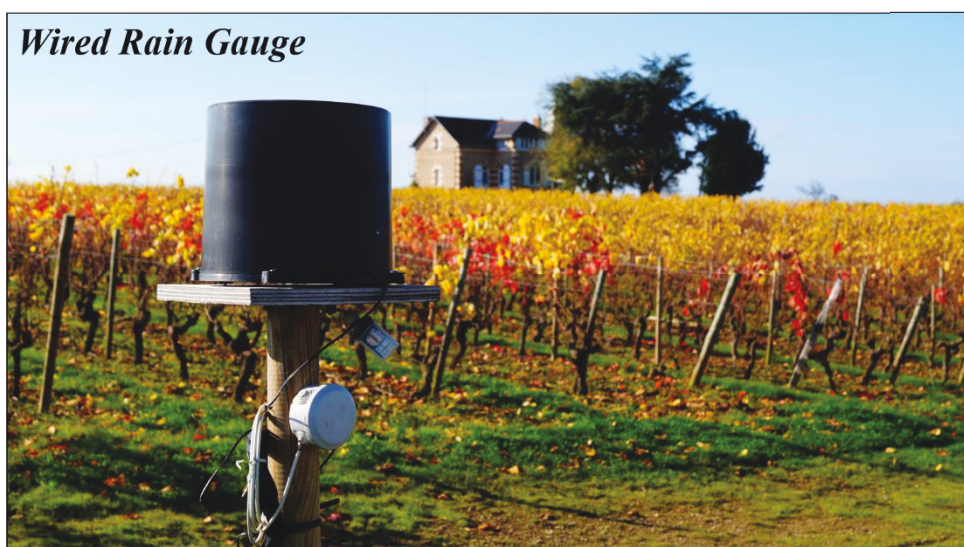
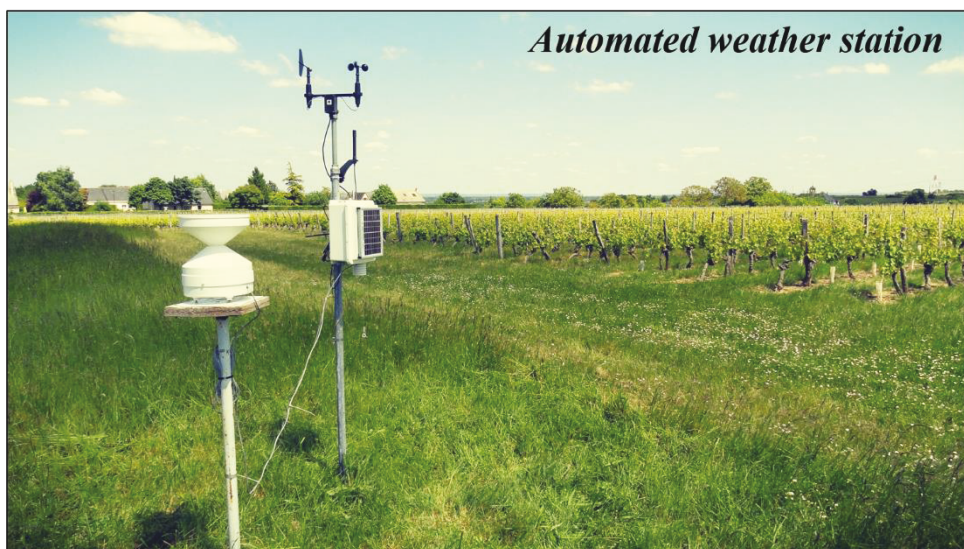
¹Abbreviations se réfèrent aux noms d'indices en anglais

²Tn = température minimale journalière, Tx = température maximale journalière.

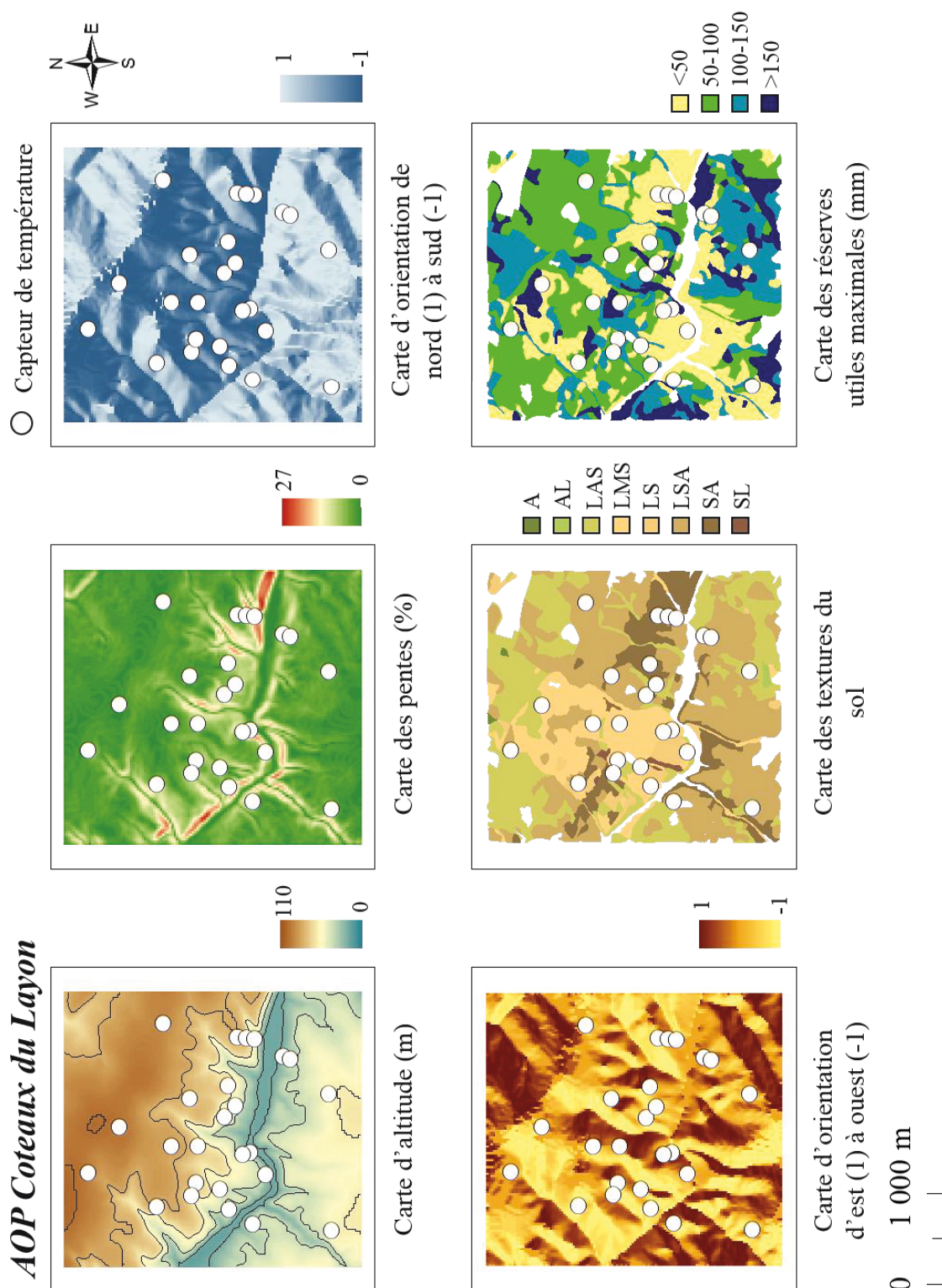
³T = Température moyenne mensuelle, P = Précipitation totale mensuelle

*k = coefficient de longueur des jours, TR = coefficient de l'amplitude thermique (Hall et Jones 2010)

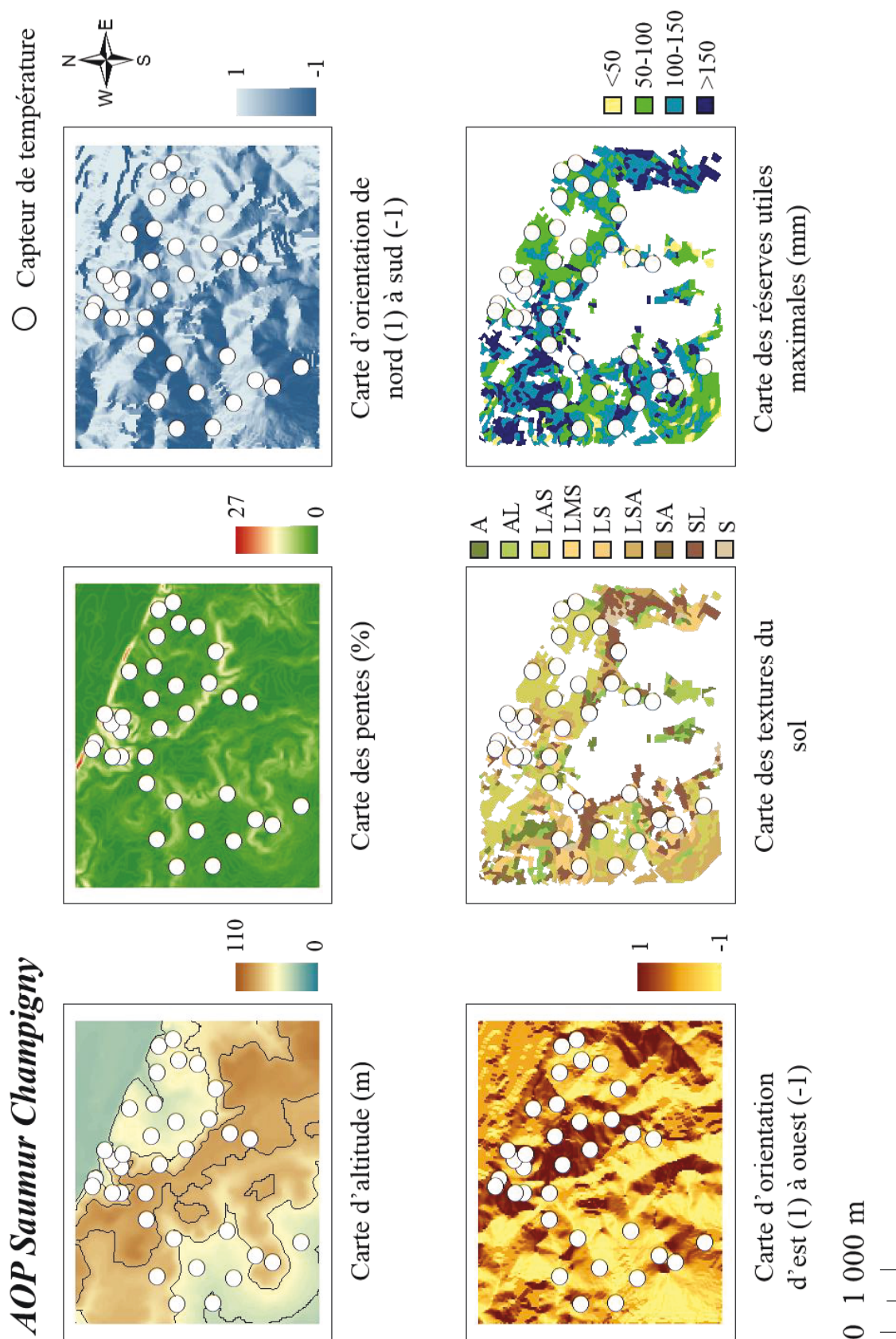
Annexe 2 : Instruments de mesures climatiques



Annexe 3 : Diversité des conditions topographiques et pédologiques du site d'étude de l'AOP Coteaux du Layon



Annexe 4 : Diversité des conditions topographiques et pédologiques du site d'étude de l'AOP Saumur Champigny



Annexe 5 : Caractéristiques des 25 capteurs de températures installés sur le site d'étude de l'AOP Coteaux du Layon

Capteur	Caractéristiques topographiques			Caractéristiques pédologiques			
	Altitude (m)	Pente (%)	Orientation	Milieu	Texture	Profondeur (cm)	Réservoir utilisable maximal (mm)
C1	92	1,3	SSO	Roche	LSA	65	60
C2	79	2,3	O	Roche	SA	26	20
C3	68	12,2	SSE	Roche	SA	26	20
C4	47	21,3	SSE	Roche	LSA	60	56
C5	75	2,1	SSO	Roche	LSA	65	56
C6	53	4,7	SSO	Roche	LSA	70	57
C7	48	8,5	SSO	Roche	SA	20	15
C8	67	6,3	SSO	Roche	SA	20	15
C9	95	2,3	S	Roche	LMS	50	39
C10	97	1,1	S	Roche	LMS	55	46
C11	84	0,4	SE	Altération	LMS	80	71
C12	70	4,5	SSE	Roche	LMS	70	67
C13	37	18,8	ESE	Autre	LMS	90	71
C14	20	10,5	ESE	Autre	LMS	90	71
C15	28	16,3	SSE	Roche	LMS	60	39
C16	41	5,7	ESE	Roche	LMS	60	52
C17	47	5,3	SSE	Roche	LMS	50	48
C18	66	6,2	OSO	Autre	LMS	110	121
C19	75	5,5	SSO	Roche	LMS	45	30
C20	73	9,3	OSO	Roche	LMS	45	41
C21	36	5,3	NNE	Altération	LSA	120	137
C22	25	7,1	NNE	Roche	LSA	40	27
C23	56	2,6	NNO	Altération	LSA	80	69
C24	53	5,8	NNO	Roche	LSA	45	35
C25	38	3,6	NNE	Roche	LSA	40	37

Annexe 6 : Caractéristiques des 35 capteurs de températures installés sur le site d'étude de l'AOP Saumur Champigny

Capteur	Caractéristiques topographiques				Caractéristiques pédologiques			
	Altitude (m)	Pente (%)	Orientation	Distance de la Loire (m)	Milieu	Texture	Profondeur (cm)	Réservoir utilisable maximal (mm)
S1	63	5.3	NNE	348	Altération	LSA	> 120	104
S2	56	3.5	ESE	327	Roche	LSA	80	65
S3	65	6.0	NNE	790	Altérite	AS	> 120	139
S4	88	0.4	SE	1141	Altération	AS	> 120	138
S5	86	1.7	ESE	590	Altération	LS	> 120	166
S6	72	7.3	NNE	401	Altération	LSA	> 120	122
S7	51	10.9	ENE	236	Autre	LS	> 120	154
S8	63	8.4	ESE	509	Roche	LAS	70	58
S9	55	0.0	N	225	Roche	LAS	> 120	90
S10	44	3.7	SSE	541	Roche	LAS	> 120	82
S11	45	2.9	N	375	Altération	LAS	> 120	116
S12	54	0.9	OSO	2579	Autre	LS	> 120	133
S13	53	3.5	NNO	388	Roche	LAS	> 120	93
S14	56	1.1	N	698	Altération	LAS	> 120	108
S15	56	3.2	NE	649	Altérite	AL	> 120	136
S16	82	1.3	ONO	2145	Roche	A	50	49
S17	83	1.3	OSO	1818	Altération	AS	> 120	111
S18	60	3.3	NNE	1414	Autre	SA	> 120	103
S19	62	2.6	NNO	1337	Autre	SL	> 120	95
S20	52	2.1	SSE	734	Roche	LAS	90	89
S21	68	4.1	ESE	1096	Autre	SL	> 120	91
S22	65	6.1	NNE	1334	Autre	SA	> 120	103
S23	46	2.2	ENE	988	Altération	LAS	> 120	117
S24	87	1.3	ESE	1360	Roche	LAS	80	64
S25	59	1.8	ONO	1003	Autre	SL	> 120	130
S26	63	7.7	ESE	676	Roche	LSA	70	53
S27	47	2.0	SSE	3674	Roche	LSA	> 120	98
S28	78	0.4	SO	3454	Roche	LS	> 120	130
S29	63	5.1	NNO	3171	Autre	LS	> 120	153
S30	75	1.1	N	2105	Autre	LS	> 120	115
S31	59	3.2	SSO	1901	Autre	SL	> 120	96
S32	65	7.6	SSE	2654	Autre	LSA	> 120	158
S33	47	2.3	N	3058	Autre	LSA	> 120	177
S34	40	1.2	NO	3031	Autre	LSA	> 120	141
S35	48	0.0	N	2468	Altération	AS	100	97

Annexe 7 : Caractéristiques des 12 parcelles suivies dans chaque site d'étude

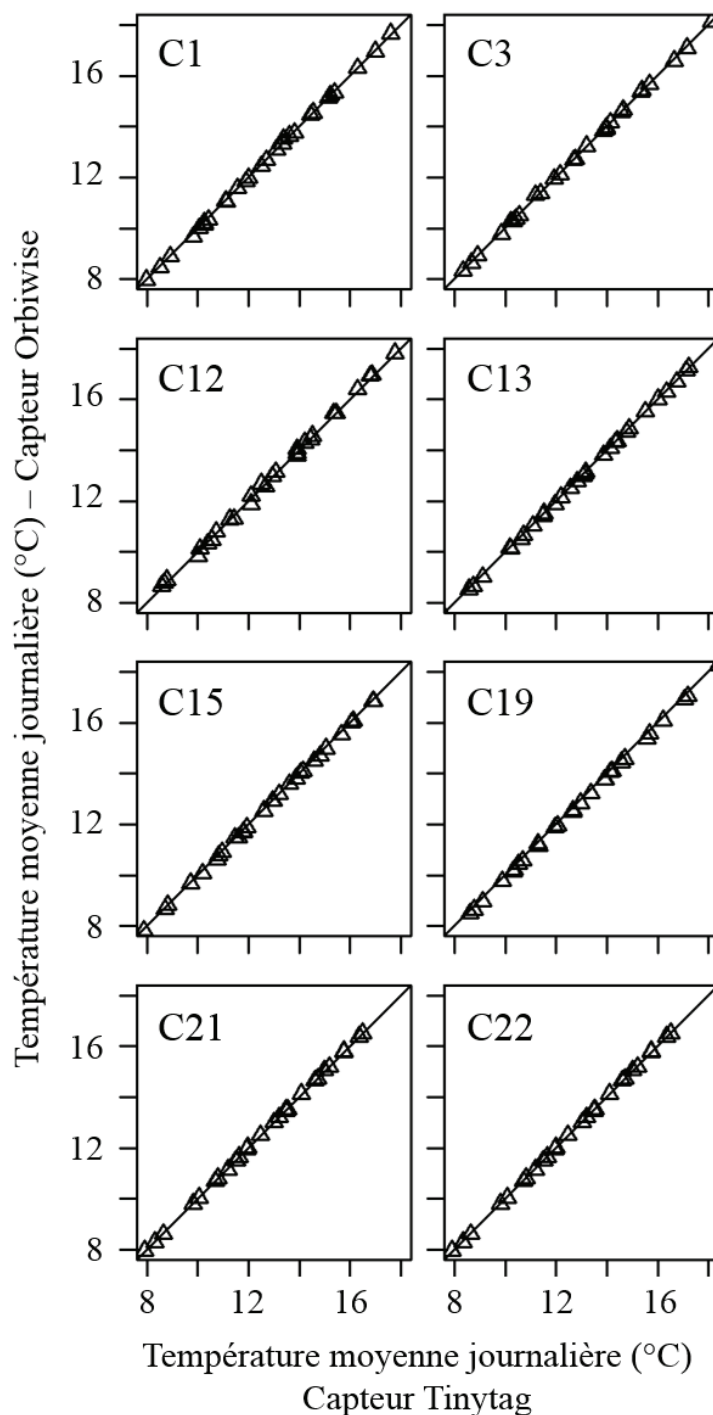
Parcelle	Cépage	Porte-greffe	Année Plantation	Mode de production	Système de taille	Gestion de l'inter-rang ^a
COTEAUX DU LAYON						
C1	Chenin	Riparia	2006	Biologique	Cordon de Royat	TS 1/2 et ENM 1/2
C2	Chenin	Paulsen	2005	Raisonnée	Guyot Double	ENM 1/1
C4	Chenin	Paulsen	2005	Raisonnée	Guyot Simple	TS 1/2 et ENM 1/2
C8	Chenin	101-14	2004	Raisonnée	Guyot double réduite	TS 1/2 et EPM 1/2
C9	Chenin	101-14	2004	Raisonnée	Guyot double réduite	TS 1/2 et EPM 1/2
C10	Chenin	Riparia	1995	En transition Bio	Guyot Simple	TS 2/3 et ENM 1/3
C12	Chenin	Riparia	1993	Biodynamique	Guyot Double	TS 1/1
C17	Chenin	Riparia	2000	En transition Bio	Cordon de Royat	TS 2/3 et ENM 1/3
C19	Chenin	Riparia	2000	En transition Bio	Cordon de Royat	TS 1/2 et ENM 1/2
C21	Chenin	101-14	1990	Conventionnelle	Guyot Simple	TS 1/2 et EPM 1/2
C23	Chenin	Riparia	2003	Conventionnelle	Cordon de Royat	TS 1/2 et EPM 1/2
C24	Chenin	Riparia	1997	Conventionnelle	Guyot double réduite	TS 1/2 et EPM 1/2
SAUMUR CHAMPIGNY						
S4	Cabernet franc	3309 C	1994	Conventionnelle	Guyot Simple	EPM 1/1
S6	Cabernet franc	3309 C	1986	Conventionnelle	Guyot Simple	TS 1/2 et EPM 1/2
S8	Cabernet franc	3309 C	2000	Biologique	Guyot Simple	TS 1/1
S11	Cabernet franc	3309 C	1998	Conventionnelle	Guyot Simple	EPM 1/1
S16	Cabernet franc	Fercal	1998	Conventionnelle	Guyot Simple	TS 1/2 et EPM 1/2
S19	Cabernet franc	3309 C	1985	Raisonnée	Guyot Simple	EPM 1/1
S20	Cabernet franc	3309 C	1973	Biologique	Guyot Simple	EPM 1/1
S25	Cabernet franc	3309 C	1984	Conventionnelle	Guyot Simple	EPM 1/1
S27	Cabernet franc	Fercal	1997	Raisonnée	Guyot Simple	EPM 1/1
S28	Cabernet franc	SO4	1984	Raisonnée	Guyot Simple	TS 1/2 et EPM 1/2
S30	Cabernet franc	SO4	1980	Biologique	Guyot Simple	TS 1/2 et ENM 1/2
S32	Cabernet franc	SO4	1982	Raisonnée	Guyot Simple	EPM 1/1

^aTS = Travail du sol, ENM = Enherbement naturel maîtrisé, EPM = Enherbement permanent maîtrisé

^a1/2 = un rang sur deux, 1/3 = un rang sur trois, 2/3 = deux rangs sur trois

Annexe 8 : Comparaison des données journalières enregistrées en Avril 2015 sur plusieurs parcelles du site d'étude de l'AOP Coteaux du Layon.

Ces parcelles ont été équipées de capteurs « type Tinytag » et « type Orbiwise »



Annexe 9 : Variables climatiques calculés des données issues des stations météorologiques installées dans les sites d'étude de l'AOP Coteaux du Layon et l'AOP Saumur Champigny

Spatial variability in climate variables, calculated from the network of weather stations and rainfall gauges in the experimental sites of the AOP Coteaux du Layon and AOP Saumur Champigny

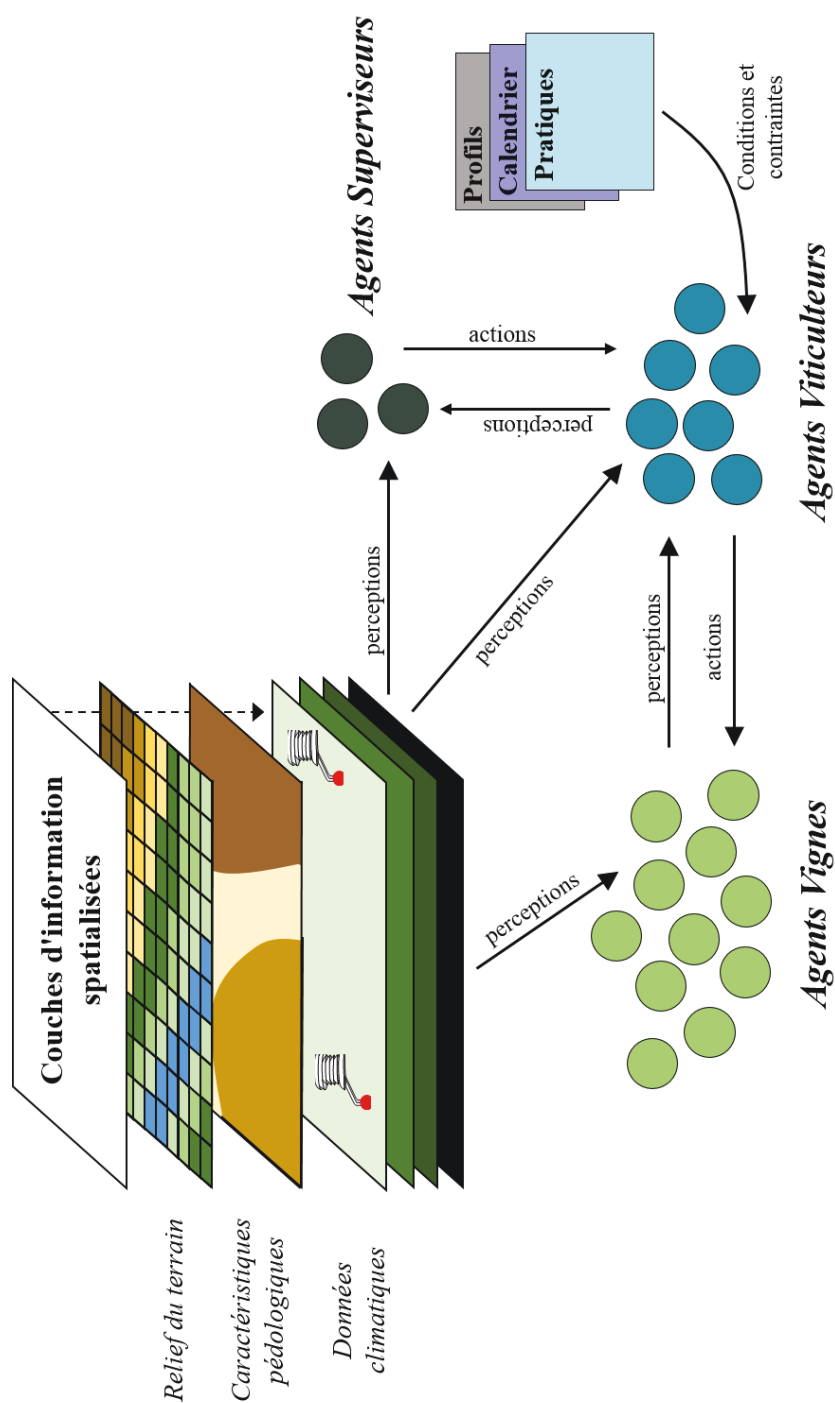
Variables	2013				2014				2015			
	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a	Mean ^a	Std	Min ^a	Max ^a
COTEAUX DU LAYON												
<i>Growing season^b</i>												
Tm (°C)	16.3	0.2	16.1	16.5	16.7	0.4	16.3	17.1	16.6	0.2	16.5	16.9
Tn (°C)	10.7	0.5	10.1	11.1	11.1	0.9	10.2	11.8	10.6	0.6	10.1	11.3
Tx (°C)	21.9	0.4	21.4	22.3	22.3	0.2	22.1	22.6	22.7	0.2	22.5	22.9
P (mm)	291	12.7	277	310	325	17.7	291	342	332 ^c	8.7 ^c	327 ^c	342 ^c
SAUMUR CHAMPIGNY												
<i>Growing season^b</i>												
Tm (°C)	16.6	0.3	16.4	17.0	17.2	0.4	16.8	17.5	17.3	0.2	17.1	17.6
Tn (°C)	11.1	0.4	10.7	11.7	11.8	0.6	11.1	12.3	11.4	0.5	11.0	12.0
Tx (°C)	22.1	0.3	21.6	22.3	22.6	0.1	22.5	22.6	23.2	0.3	22.7	23.5
P (mm)	364	23.4	331	402	381	29.2	342	407	324 ^c	8.6 ^c	317 ^c	334 ^c

^aMean, minimum and maximum values obtained from the network of weather stations and rain gauges

^bCalculated from 1 April to 30 September

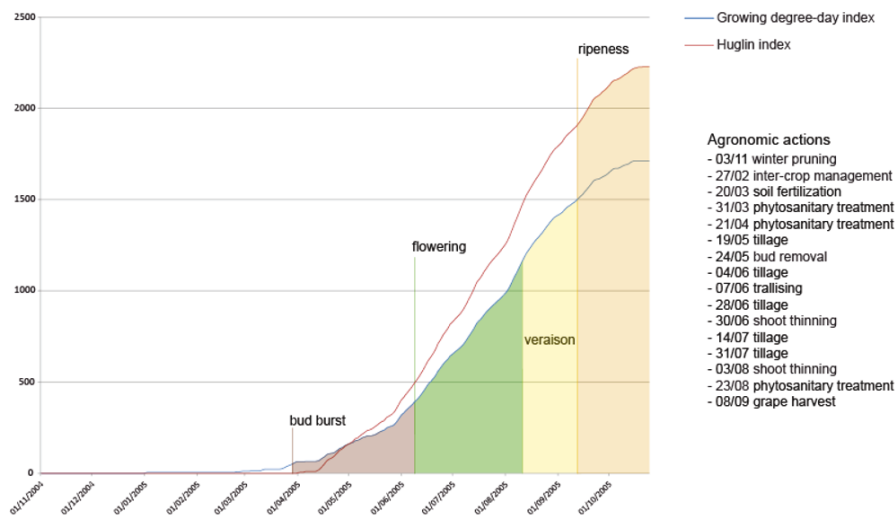
^cLack in complete data from all rain gauges and weather stations

Annexe 10 : Environnement de simulation du modèle multi-agents



Annexe 11 : Résultats des simulations issues du modèle multi-agents de deux années climatiques contrastées

Warm and dry growing season : 2005



Wet and relatively cool growing season : 2007

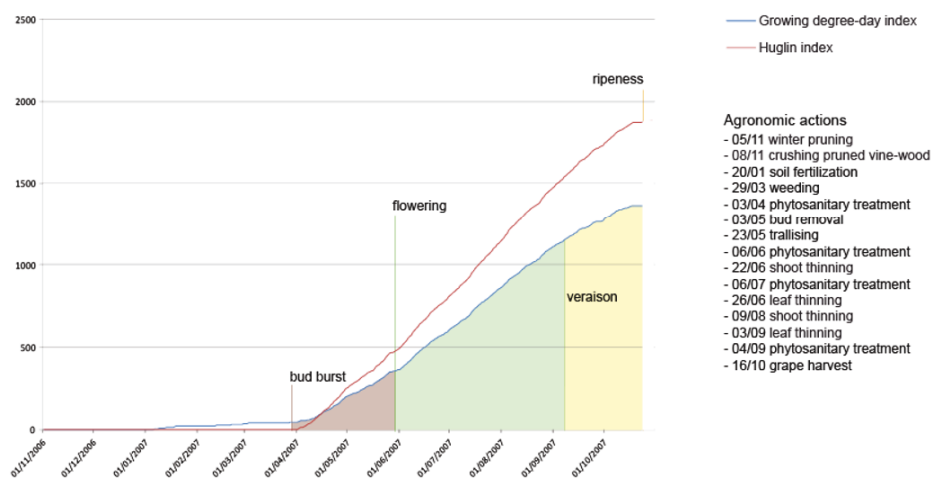


TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE : LA VITICULTURE FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : CONTEXTE ET ENJEUX.....	7
CHAPITRE 1 : DE LA VIGNE AU VIN : LE ROLE DU CLIMAT ET DES DIMENSIONS HUMAINES.....	9
1.1. Facteurs climatiques	11
1.1.1. Le rayonnement solaire.....	11
1.1.2. La température de l'air.....	12
1.1.3. Les précipitations	15
1.1.4. Le vent	16
1.2. La complexité spatiale de la viticulture	16
1.2.1. Au niveau global	18
1.2.2. Au niveau régional.....	20
1.2.3. Au niveau local	23
1.2.4. Au niveau parcellaire	26
1.3. La dynamique temporelle de la viticulture	27
CHAPITRE 2 : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET LA VITICULTURE ...	33
2.1. Le changement climatique	34
2.1.1. Le système climatique	34
2.1.2. Les changements observés à l'échelle planétaire.....	37
2.2. La tendance future du changement climatique	40
2.2.1. Modélisation du climat futur à l'échelle planétaire.....	41
2.2.2. Vers une modélisation adaptée aux études d'impact du changement climatique.....	43
2.3. Le changement climatique et la viticulture.....	44
2.3.1. Le cas du Val de Loire	45

CHAPITRE 3 : VERS UNE ADAPTATION RAISONNEE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	51
3.1. Approche d'évaluation basée sur les scénarios climatiques	52
3.2. Approches d'évaluation basées sur la connaissance locale	56
DEUXIÈME PARTIE : LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN ANJOU-SAUMUR AU COURS DU 21^E SIECLE.....	63
ANJOU-SAUMUR.....	65
CHAPITRE 4 : PROJECTED CLIMATE CHANGES AND POTENTIAL IMPACTS IN THE ANJOU-SAUMUR WINE GROWING SUB-REGION	69
4.1. Study methodology	70
4.1.1. Simulated data and projections	70
4.1.2. Data analyses and assessment methods	71
4.1.3. Model performance and uncertainties.....	72
4.2. Results.....	73
4.2.1. Changes in average annual and seasonal temperatures.....	74
4.2.2. Projected changes in total annual and seasonal rainfall.....	76
4.2.3. Future trends in viticultural indices	78
4.2.4. Phenology responses to projected warming: Example of Montreuil-Bellay	80
4.3. Discussion.....	82
TROISIÈME PARTIE : LA DIVERSITE ET LA COMPLEXITE DE L'ENVIRONNEMENT LOCAL ET DES PRATIQUES DE GESTION.....	87
AOP COTEAUX DU LAYON ET AOP SAUMUR CHAMPIGNY	89
CHAPITRE 5 : TEMPORAL AND SPATIAL CLIMATE VARIABILITY AT LOCAL VINEYARD SCALES	93
5.1. Study methodology	94
5.1.1. Climate data	94
5.1.2. Climate analysis	96
5.2. Results.....	97
5.2.1. Temporal and spatial variability in mesoclimatic conditions	97
5.2.2. Temporal and spatial variability in local climatic conditions.....	97

CHAPITRE 6 : IMPACTS OF CLIMATE VARIABILITY ON GRAPEVINE BEHAVIOR AT LOCAL VINEYARD SCALES.....	107
6.1. Study methodology	108
6.1.1. Viticultural observations	108
6.2. Results.....	110
6.2.1. Growing season climate variability	110
6.2.2. Variability in grapevine phenology	111
6.2.3. Variability in grape composition	113
CHAPITRE 7 : ASSESSING LOCAL CLIMATE VULNERABILITY AND WINEGROWERS' ADAPTIVE PROCESSES.....	119
7.1. Study methodology	120
7.1.1. Participating winegrowers	120
7.1.2. Semi-structured interviews	120
7.1.3. Qualitative content analysis	121
7.1.4. Climate variability	122
7.2. Results.....	122
7.2.1. Exposure and sensitivity of wine quality to past and current climate conditions	122
7.2.2. Changing viticultural practices in response to climate and non-climate related variables.....	126
7.2.3. Winegrowers' adaptive responses to climate conditions.....	129
7.2.4. Winegrowers' perceptions and adaptation priorities to climate change	133
CONCLUSION GÉNÉRALE	137
LISTE DES ABRÉVIATIONS	143
LISTE DES FIGURES.....	145
LISTE DES TABLEAUX	151
BIBLIOGRAPHIE	155
ANNEXES.....	177
TABLE DES MATIÈRES	191

ADAPTATION DE LA VITICULTURE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : VERS DES STRATÉGIES À HAUTE RÉOLUTION

Résumé

L'adaptation au changement climatique est un défi majeur pour la viticulture. Dans un cadre temporel et spatial approprié, l'objectif de cette thèse était d'améliorer la conception de l'adaptation de la viticulture au changement climatique, dans le but de construire des stratégies à haute résolution. Le cadre méthodologique utilisé dans cette étude est constitué de plusieurs étapes. Par l'utilisation d'un modèle climatique régional, la première étape a été d'évaluer les impacts potentiels des changements climatiques futurs sur viticulture dans la sous-région d'Anjou-Saumur. Le réchauffement attendu de +1.1°C à +3.8°C à l'horizon 2071-2100 devrait entraîner une avancée significative de la phénologie de la vigne. Dans un deuxième temps, deux sites d'études contrastées en Anjou-Saumur ont fait l'objet de mesures climatiques et agronomiques à l'échelle fine des vignobles. Pendant trois années consécutives, la variabilité locale du climat et du comportement de la vigne a été étudiée. Les résultats ont montré une forte variabilité spatiale des conditions climatiques locales, qui s'est traduite par des différences de phénologie de la vigne et de composition des raisins. La connaissance de cette variabilité apparaît ainsi comme un outil d'adaptation permettant aux viticulteurs de compenser les effets du changement climatique. Enfin, à l'aide d'entretiens semi-directifs individuels, les perceptions, la vulnérabilité et les processus d'adaptation des viticulteurs à la variabilité climatique et au changement climatique ont été évalués. Dans le contexte du changement climatique et des enjeux concernant l'adaptation, cette thèse a mis en évidence l'importance de la connaissance de l'environnement local et de la compréhension contextuelle dans l'élaboration des stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles et spatiales.

Mots clés : Adaptation, changement climatique, haute résolution, variabilité locale, viticulture

ADAPTATION OF VITICULTURE TO CLIMATE CHANGE: TOWARDS HIGH RESOLUTION STRATEGIES

Abstract

Adaptation to climate change is a major challenge facing the viticulture sector. Within an appropriate temporal and spatial framework, the aim of this thesis was to enhance the conception of climate change adaptation in viticulture, all towards constructing high resolution strategies. The methodological framework used in this study consisted of several steps. Using a regional climate model, the first step was to evaluate the potential impacts of future climate changes on grape growing in the Anjou-Saumur wine growing sub-region. With warming predicted to continue by +1.1°C to +3.8°C in the far future, grapevine phenology is expected to advance significantly. Secondly, two contrasting study areas in Anjou-Saumur were equipped with climatic and agronomic measurements at vineyard-level scales. For three consecutive growing seasons, local variability in climate- and grapevine-related variables were studied. Results have shown a strong spatial variability in local climate conditions, which were reflected on grape phenology and grape composition. This spatial heterogeneity in local conditions should represent an important buffer in response to future climate changes, allowing winegrowers to manage the expected climate change impacts. And finally, wine growers' perceptions, vulnerability and adaptive processes to climate variability and change were assessed through individual semi-structured interviews. Within the context of climate change and the key issues surrounding adaptation, this thesis have highlighted the importance of local environmental knowledge and contextual understanding in framing adaptation strategies across different temporal and spatial scales.

Key words: Adaptation, climate change, high resolution, local variability, viticulture

Laboratoire LETG Rennes, UMR 6554 CNRS
Université Rennes 2
Place du recteur Henri Le Moal
35043 RENNES cedex, France

