

Juin 2015
volume n° 5 / numéro n° 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie

Changement climatique et agriculture
comprendre et anticiper, ici et ailleurs.



Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad

Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad

Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra

- Valentin BEAUVAL, agriculteur

- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra

- Joël COTTART, agriculteur

- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech

- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie

- Yves FRANCOIS, agriculteur

- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole

- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71

- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice

- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier

- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axérial

- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal

- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea

- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure

- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais

- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche

- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro

- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne

- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément

(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

Avant-propos

P7- O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

Éditorial

P9- M. BENOÎT et E. TORQUEBIAU (coordonnateurs du numéro)

Le Changement climatique et son impact sur l'agriculture : état des lieux, prévision et prospective

P13- Vers une prospective des impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire : les enseignements du 5ème rapport du GIEC

T. BRUNELLE (CIRAD)

P23- Evolutions constatées et prévisibles des principales composantes du climat impactant l'agriculture

F. HABETS (CNRS) et P. VIENNOT (Mines-ParisTech)

P33- Prospective Agriculture Forêt Climat (AFClm) du Centre d'étude et de prospective du MAAF

N. SCHALLER

S'adapter au changement climatique : outils, moyens et acteurs

P41- S'adapter au changement climatique

Agriculture, écosystèmes et territoires (Jean-François Soussana Coord.)

E. TORQUEBIAU (Cirad)

P43- L'observation des effets agricoles du changement climatique en France : combat d'arrière-garde, ou aide à l'adaptation ?

F. LEVRAULT (CRA POITOU-CHARENTES)

P55- Impacts du changement climatique sur les pratiques agricoles : évolution des calendriers culturels en région de polyculture-élevage

M. BENOÎT (Inra), T. FOURNIER, C. DE LA TORRE

P67- Adaptation au changement climatique en agronomie viticole : le programme Icare

G. BARBEAU, E. NEETHLING, N. OLLAT, H. QUENOL, J.M. TOUZARD

P77- Prospective participative sur l'agriculture du Roussillon face au changement climatique

P. GARIN, D. ROLLIN, L. MATON, J.D. RINAUDO, A. RICHARD-FERROUDJI, Y. CABALLERO

P87- Retour sur le colloque final du projet ADAPT'EAU

N. SCHALLER

P89 - Stratégies d'adaptation aux changements climatiques d'agriculteurs du Nicaragua : actions d'AVSF

L. DIETSCH (AVSF)

P93- Adaptations paysannes aux changements et aléas climatiques dans trois régions du monde

M.J. DUGUE

S'adapter au changement climatique et en atténuer les effets

P99- Changement climatique et Agricultures du Monde (Editions Quae, Torquebiau, E. (Ed)).

M. BENOÎT (Inra)

P101- Le fonio : une culture climato intelligente ?

N. ANDRIEU, E.VALL, M. BLANCHARD, F. BEAVOGUI, D. SOGODOGO

P107- Reconsidérer les rôles agronomiques de l'élevage dans la contribution à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique

V. BLANFORT, M. VIGNE, J. VAYSSIERES, P. LECOMTE, J.LASSEUR, A. ICKOWICZ (Cirad)

P117- Agribalyse : résultats et enseignements

A. COLSAET, V. COLOMB et J. MOUSSET (ADEME)

P133- Stratégies d'atténuation mises en œuvre sur les territoires : l'outil et la démarche ClimAgri®

S. MARTIN (ADEME)

P139- Agriculture et gaz à effet de serre (Sylvain Pellerin et al.)

M. BENOÎT (Inra)

Annexe

P141 Appel à contribution du numéro



favorable basis for feeding the co-construction of agricultural knowledge between winegrowers, technicians and researchers.

Key-words

Agronomy, climate change, adaptation.

Changement climatique et fonctionnement de la vigne : le constat de la recherche

Depuis une vingtaine d'années, les rapports successifs du GIEC¹ alertent la communauté internationale sur le changement climatique en cours et ses effets potentiels sur les systèmes naturels et humains.

Peu de travaux avaient concerné le changement climatique et la viticulture avant la fin du XX^e siècle. Il convient de mentionner ceux de Dry (1988), Smart (1989), Kenny et Harrison (1992), et Bindi *et al.* (1996). La communauté scientifique de la filière viticole a commencé à en prendre conscience progressivement à partir du début des années 2000 avec diverses publications montrant d'une part l'évolution du climat dans certaines régions viticoles du monde et d'autre part les conséquences actuelles et futures sur le fonctionnement de la vigne et la qualité du raisin (Schultz, 2000 ; Lebon, 2002 ; Ganichot, 2002 ; Stock *et al.*, 2003 ; Cos-su *et al.*, 2004 ; Duchêne et Schneider, 2005 ; Jones *et al.*, 2005). Mais ce n'est réellement que depuis 2005 que des études sont conduites de façon systématique dans de nombreux vignobles du monde, à l'échelle d'un pays ou d'une région viticole. (Jones, 2006, 2007 ; Garcia de Cortazar-Atauri, 2006 ; Barbeau, 2007 ; Laget *et al.*, 2008 ; Webb *et al.*, 2008 ; Ramos *et al.*, 2008 ; Madelin *et al.*, 2010 ; Van Leeuwen *et al.*, 2009 ; Bonnefoy *et al.*, 2010 ; Tomasi *et al.*, 2011 ; Bonnefoy *et al.*, 2012a ; Neethling *et al.*, 2012a ; Sturman *et al.*, 2013).

Les principaux résultats font état :

- De conditions thermiques plus favorables pour le fonctionnement de la vigne dans certains vignobles,
- D'une modification de son régime d'alimentation hydrique, consécutif à une plus grande variabilité inter-annuelle de la pluviométrie et de sa répartition au cours de l'année, ainsi que d'une augmentation de l'évapotranspiration,
- De l'avancée des stades phénologiques et de la date de vendange,
- D'une augmentation de la biomasse, à pluviométrie constante, en raison de l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère,
- D'une modification de la composition des raisins avec augmentation de la teneur en sucre et baisse de l'acidité.

Nous ne reviendrons pas sur le détail de ces travaux de recherche amplement diffusés. Il nous semble par contre important de nous attacher au ressenti des acteurs de terrain car ce sont eux qui sont confrontés aux conditions et aléas climatiques et qui doivent prendre les bonnes décisions au bon moment, c'est-à-dire en fonction du stade de développement de la vigne et lorsque les conditions de climat et de

¹ Groupe international d'études sur le climat

Adaptation au changement climatique en agronomie viticole

Adapting to climate change in grapevine agronomy

BARBEAU G.^{1*} - NEETHLING E.^{1,3} - OLLAT N.²
QUÉNOL H.³ - TOUZARD JM.⁴

¹UVV, INRA - 42, rue Georges Morel Boîte Postale - 60057 - 49 071 Beaucozoué - France

²UMR EGFV, ISVV-INR-Bordeaux Sciences Agro - 33140 Villenave d'Ornon - France

³UMR Costel, CNRS-Univ de Rennes - Place du Recteur Henri Le Moal - 35043 Rennes - France

⁴UMR Innovation, INRA-Supagro - 2, place Pierre Viala - 34060 Montpellier - France

*Contact : gerard.barbeau@angers.inra.fr

Résumé

Le changement climatique affecte la vigne et le vin, et conduit les viticulteurs à repenser leurs stratégies et pratiques agronomiques. L'évolution du climat au cours des dernières décennies a concerné principalement l'augmentation des températures. Elle s'est traduite par une avancée des stades phénologiques et de la date de vendange, accompagnée d'une augmentation de la teneur en sucres du raisin et d'une baisse de son acidité. La poursuite du changement climatique pose de nombreuses questions, allant du devenir des terroirs et de la typicité des vins jusqu'au maintien même d'une activité économique dans certaines régions viticoles. La vigne étant une plante pérenne cultivée dans des milieux très différents, les stratégies d'adaptation sont à la fois riches d'expériences existantes et complexes à mettre en œuvre de par la diversité des facteurs environnementaux et humains à intégrer. Elles offrent une base propice pour alimenter la co-construction de connaissances agronomiques entre viticulteurs, techniciens et chercheurs.

Mots-clés

Agronomie viticole, changement climatique, adaptation.

Abstract

Climate change impacts grapevine and wine and questions winegrowers about their strategies and agronomical practices. From a research point of view, climate change over the past decades has mainly concerned the increase in temperatures. It has resulted in advanced phenological stages and harvest date, accompanied by an increase in grapes sugar content and a decrease in their acidity. The perception of climate change by the growers has been studied for the last 15 years. Most of them have also noted changes in climatic conditions and vine behavior. Continued climate change raises many questions, ranging from the future of "terroirs" and wines typicality up to the very maintenance of an economic activity in some wine-growing regions. Grapevine is a perennial plant grown in very different environments; therefore adaptation strategies must be considered in each region from the short term to the long term and declined from the parcel to the territory. They are both rich in existing experiences and complex in their implementation due to the diversity of environmental and human factors to integrate. They offer a

sol sont favorables. En effet, la vigne est une plante pérenne où la prise de décision et les pratiques de gestion viticoles sont raisonnées en lien avec la variabilité climatique inter-annuelle.

Perception du changement climatique par les acteurs

La perception du changement climatique et de ses effets sur la vigne a commencé à être abordée dès le début des années 2000. Une enquête sur la perception des viticulteurs de 3 pays européens (Allemagne, France, Italie) a été réalisée en 2002, donc avant la canicule européenne, enquête coordonnée par le PIK² de Potsdam (Battaglini *et al.*, 2009). 85% des répondants avaient noté un changement du climat, affectant principalement la température et la pluviométrie. Cela se traduisait par une avancée des stades phénologiques et des conséquences négatives sur les rendements, positive sur la qualité des baies et variable quant à l'incidence des maladies. Des divergences apparaissaient quant aux stratégies d'adaptation à mettre en œuvre, en relation avec la réglementation en vigueur dans chaque pays.

Une seconde enquête au niveau national fut réalisée par l'IFV³ en 2009 (Rochard *et al.*, 2010). Elle interrogeait non seulement des professionnels mais également des experts. Plus de la moitié estimaient que des changements étaient apparus au cours des 15 dernières années, avec augmentation des sécheresses, fréquence des orages et pluies violentes, mais peu d'incidence sur les épisodes de grêle ou les gelées printanières. Des modifications significatives étaient perçues au vignoble avec avancée des stades phénologiques et de la date de vendange, raccourcissement du cycle, augmentation de la teneur en sucre, baisse de l'acidité, et impact significatif sur les maladies et parasites.

Ces enquêtes par formulaire papier ou internet avaient un caractère assez général et ne prenaient pas en compte les systèmes d'exploitation ni les préoccupations des viticulteurs à l'échelle du territoire. C'est pourquoi 3 enquêtes semi-directives, très localisées, très techniques et indépendantes, ont été réalisées de 2011 à 2013 (Tableau 1). Elles ont concerné à la fois des systèmes d'exploitation conventionnels [C], raisonnés [R] et biologiques [B].

La première avait pour objectif d'analyser la sensibilité des pratiques annuelles aux conditions climatiques, en décortiquant les périodes de travail, les techniques et équipements utilisés et les variables climatiques favorables et défavorables. Les deux suivantes abordaient la vulnérabilité locale et la capacité d'adaptation des viticulteurs en se basant sur le vécu récent et leur vision du futur proche, en essayant de déterminer les conditions climatiques qui font un bon ou un mauvais millésime et enfin les stratégies d'adaptation mises en œuvre ou à mettre en œuvre dans un contexte de changement climatique.

	1. Enquête 2011	2. Enquête 2012	3. Enquête 2013
Effectifs	15 viticulteurs • 3C - 6R - 6B	15 viticulteurs • 4C - 8R - 3B	15 viticulteurs • 5C - 7R - 3B
Site	Anjou et Saumur	AOP Coteaux du Layon	AOP Saumur Champigny
Objectif de l'étude	Sensibilité des pratiques annuelles aux conditions climatiques	Vulnérabilité locale et la capacité d'adaptation des viticulteurs	Vulnérabilité locale et la capacité d'adaptation des viticulteurs
Méthode	Semi-directive	Semi-directive	Semi-directive
Questions et thèmes abordés	<ul style="list-style-type: none"> Pratiques et période de travail Techniques et équipements impliqués Variables climatiques favorables et défavorables 	<ul style="list-style-type: none"> Comment les pratiques ont évolué Conditions climatiques caractérisant « bons » et « mauvais » millésimes Stratégies d'adaptation au climat passé et futur 	<ul style="list-style-type: none"> Comment les pratiques ont évolué Conditions climatiques caractérisant « bons » et « mauvais » millésimes Stratégies d'adaptation au climat passé et futur

Tableau 1 : Synthèse des enquêtes semi-directives, localisées, effectuées de 2011 à 2013
Table 1: Synthesis of the local, semi-structured interviews conducted from 2011 to 2013

Les résultats de la première enquête (Barbeau *et al.*, 2014) ont permis d'identifier 21 pratiques agronomiques annuelles communes à tous les vigneron et les différentes conditions météorologiques défavorables pour leur réalisation dans de bonnes conditions (Figure 1.). En effet chacune de ces pratiques doit être réalisée à une période bien précise de l'année et durant un laps de temps déterminé, en relation avec la physiologie de la vigne. La pratique la plus sensible aux conditions météorologiques est sans conteste la protection phytosanitaire du vignoble, fortement dépendante des températures (minimale et maximale), de la pluie (avant, pendant et après l'intervention), de l'hygrométrie de l'air et de la vitesse du vent. Elle est suivie par l'entretien du sol qui peut être rendu impossible suite à un excès d'humidité du sol (problèmes de portance et/ou de tractabilité) ou au contraire une trop forte sécheresse, des pluies abondantes au moment de l'intervention ou encore le gel. En troisième position viennent les chantiers de vendange qui peuvent être perturbés par des épisodes pluvieux continus ou violents ainsi que des températures élevées.

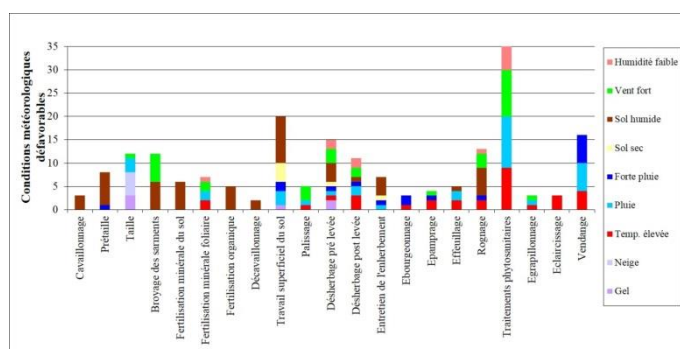


Figure 1 : Conditions météorologiques défavorables qui ont un impact sur 21 pratiques viticoles en moyenne vallée de la Loire au moment de leur réalisation (nombre de citations au cours de l'enquête)

Figure 1: Unfavorable weather conditions having an impact on 21 viticultural practices in the middle Loire Valley at the time of their realization (number of citations during the survey)

² Potsdam Institute for Climate Impact Research

³ Institut français de la vigne et du vin

Les enquêtes 2 et 3, portant chacune sur une AOP⁴ de la moyenne vallée de la Loire, ont permis de mettre en évidence les leviers d'action dont disposent les viticulteurs concernant les pratiques annuelles qui permettent de maîtriser la vigueur, le rendement et la qualité du raisin (Neethling et al., 2012c ; Neethling et al. 2013a ; Petitjean, 2013). Le facteur climatique est régulièrement pris en compte pour l'adaptation de ces pratiques annuelles, mais il n'est pas le seul. Cela a pu être mis en évidence grâce au fait que le changement climatique n'était pas mentionné dans la première partie de l'enquête. Ce n'est qu'à la fin que les viticulteurs étaient questionnés sur leur perception du changement climatique.

A titre d'exemple, l'entretien du sol dans les inter-rangs a beaucoup évolué au cours des 30 dernières années (Figure 2). On est passé du tout chimique à l'enherbement systématique de tous les inter-rangs, d'abord pour des raisons de prise de conscience environnementale, des raisons économiques, mais aussi de contraintes liées au milieu naturel. Puis, durant la dernière décennie caractérisée par de nombreuses années chaudes et sèches, on est passé à l'enherbement maîtrisé pour ajuster le pourcentage d'enherbement et le type d'herbe aux conditions édaphiques de la parcelle et aux conditions climatiques de l'année. Suite à deux récentes années pluvieuses (2012 et 2013) plusieurs viticulteurs envisagent de revenir à l'enherbement systématique de tous les inter-rangs.

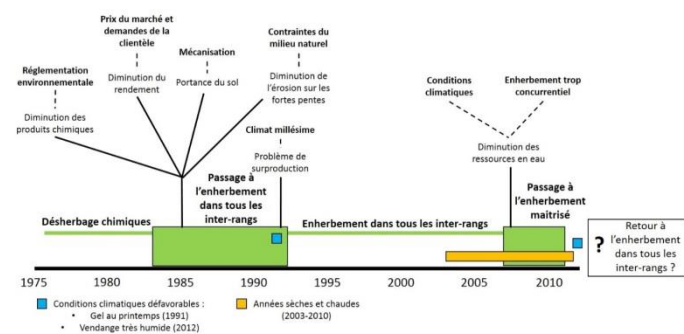


Figure 2 : Évolution de l'entretien du sol dans les inter-rangs de l'AOP Saumur-Champigny (Petitjean, 2013)

Figure 2: Evolution of vine inter-row management practices in the AOP Saumur-Champigny (Petitjean, 2013)

L'évolution du climat n'est actuellement pas prise en compte par les viticulteurs en ce qui concerne les pratiques pérennes : choix du porte-greffe, du cépage, du site, de la densité de plantation, de la protection contre le gel de printemps... Pour le futur proche, ils restent très pragmatiques et n'envisagent que des adaptations de leurs pratiques annuelles. Pour eux, les bons millésimes correspondent plutôt à des années sèches, avec des températures estivales élevées, ce qui s'est produit fréquemment au cours des vingt dernières années. Les mauvais millésimes sont les années de gel ou de post-gel et les années excessivement pluvieuses, particulièrement les périodes de vendange très humides.

La majeure partie des viticulteurs enquêtés a noté un changement du climat, avec une augmentation des périodes de sécheresse et d'événements climatiques extrêmes, ce qui s'est traduit par une avancée des stades phénologiques et des dates de vendange, mais pas forcément de modification de l'expression des maladies (Figure 3). Le changement

climatique est considéré comme bénéfique par les vignerons de la moyenne vallée de la Loire car la fréquence de bons millésimes a fortement augmenté au cours des 30 dernières années, même si d'autres facteurs que le climat ont également joué un rôle (technification, meilleure connaissance des unités de terroirs de base⁵, ...). Sur l'ensemble du Val de Loire, il a été montré que le changement climatique explique 60% de l'augmentation de la teneur en sucre et de la baisse de l'acidité enregistrées au cours des 40 dernières années pour les 6 principaux cépages qui y sont cultivés (Neethling et al., 2012b).

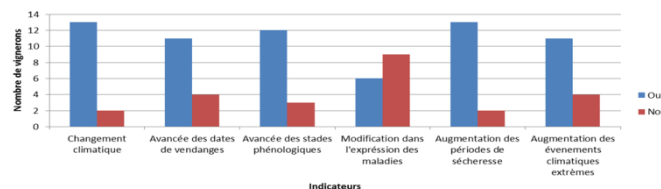


Figure 3 : Perception par les vignerons du changement climatique et de ses effets dans l'AOP Saumur-Champigny (Petitjean, 2013)

Figure 3: Winegrowers perception of climate change and its effects in the AOP Saumur-Champigny (Petitjean, 2013)

Les questions posées à la viticulture par la poursuite du changement climatique

La poursuite du changement climatique au cours du XXIème siècle est désormais avérée ; les augmentations de température prévues, de l'ordre de 1,5 à 4,8°C selon les scénarii et les sites, font l'objet d'un réel consensus (IPCC, 2013). Les prévisions sur l'évolution de la pluviométrie demeurent, elles, sujettes à incertitudes. La tendance est cependant à une augmentation de la sécheresse estivale dans les climats méditerranéens de la planète, là où se situent de grands vignobles mondiaux – Afrique du Sud, Argentine, Australie, Californie, Chili. En ce qui concerne l'Europe, elles font état d'un assèchement de la zone méditerranéenne et d'une augmentation des précipitations en Europe du nord, ce qui laisse planer de grandes incertitudes pour les régions qui se situent entre les deux, en particulier les régions viticoles de l'ouest et du nord-est de la France. Tout ceci s'accompagnant de l'augmentation de la fréquence d'événements extrêmes : pluies diluviennes, épisodes de froid intense, épisodes de grêle, canicules. De nombreux climatologues s'accordent pour dire le changement climatique sera vraiment notable après 2030 ; des modifications majeures du climat général prendront alors le pas sur la variabilité interannuelle (Meehl et al., 2009 ; Solomon et al., 2011 ; Hawkins E. et Sutton R., 2012).

La qualité et la typicité des vins sont reconnues comme étant fortement liées à la région de production, au climat de l'année, aux composantes physiques du terroir (sol, mésoclimat) ainsi qu'aux pratiques mises en œuvre par les vignerons, tant au niveau agronomique pour obtenir un raisin de qualité qu'au niveau œnologique lors de l'élaboration du vin (Bohmrich, 1996 ; Wilson, 1998 ; Morlat, 1998 ; Morlat, 2001, Van Leeuwen et Seguin, 2006 ; Carey et al., 2008). De nombreuses études récentes démontrent que la poursuite du chan-

⁴ Appellation d'origine protégée

⁵ Une unité de terroir de base ou UTB correspond selon la définition de Morlat (2001) à une « unité spatiale de fonctionnement homogène de la vigne, valorisable par la viticulture ».

gement climatique va s'accompagner d'une avancée encore plus grande de la date des stades phénologiques et en conséquence de la date de vendanges (Garcia de Cortazar-Atauri, 2006 ; Pieri et Lebon, 2014). Les conditions thermiques pour le fonctionnement de la vigne étant généralement plus favorables, la teneur en sucre du raisin sera plus forte et son acidité plus faible. Par ailleurs, la maturation du raisin aurait lieu pendant une période de l'année plus chaude où l'amplitude thermique entre le jour et la nuit sera plus faible qu'actuellement. Or il est montré que ces conditions sont défavorables à la synthèse de la couleur chez les raisins rouges (Mori *et al.*, 2007) et à l'intensité des arômes chez les raisins blancs (Tonietto *et al.*, 2014). La qualité du raisin et la typicité du vin en seraient affectées (Sadras *et al.*, 2013). Il faudrait donc essayer de retarder le plus possible le cycle productif de la vigne pour que la récolte se déroule dans des conditions de température les plus propices à une qualité des raisins compatible avec la typicité des vins recherchée. Cependant, Duchêne *et al.* (2010) ont montré qu'il est difficile de trouver des variétés suffisamment tardives pour échapper à ces périodes de fortes températures. La recherche doit donc aussi s'orienter vers l'obtention ou l'identification de cépages/clones plus résistants aux fortes températures. La conjugaison de différentes pratiques annuelles sur vignes en place (date de taille tardive, travaux culturaux favorisant une plus grande vigueur et une augmentation de la charge) peut certes apporter des solutions mais ces pratiques comportent beaucoup de risques compte tenu de la variabilité interannuelle actuelle du climat et il est probable qu'elles ne pourront pas compenser une augmentation de température supérieure à 2°C au-delà de l'horizon 2050. Pour les plantations des prochaines années, qui seront en pleine production en 2050, les adaptations concernent donc essentiellement les pratiques pérennes, celles qui engagent le producteur pour la durée de vie de la vigne, à savoir : le choix du site (altitude, exposition, profondeur et réserve en eau du sol), du porte-greffe et du cépage. Ceci dit, les goûts et préférences des consommateurs évoluent aussi. Déjà une tendance forte se dessine en faveur de vins à degré alcoolique modéré, plus respectueux de l'environnement et qui « expriment le terroir d'origine », toutes ces informations figurant de plus en plus sur l'étiquette. On peut donc faire l'hypothèse qu'une évolution graduelle de la typicité des vins consécutive à des modifications de pratiques annuelles et pérennes peut très bien ne pas poser de problème majeur. Cela s'est déjà produit dans le passé. La notion même de terroir pourrait être remise en question par le changement climatique. C'est une question qui pouvait avoir un sens il y a quelques années mais n'est plus à l'ordre du jour depuis que l'Assemblée Générale de l'OIV a adopté en 2010, à l'unanimité de ses 43 Etats membres, la résolution sur la définition du terroir : « le terroir vitivinicole est 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 confère des caractéristiques distinctives aux produits origi-

naires de cet espace. Le terroir inclut des caractéristiques spécifiques du sol, de la topographie, du climat, du paysage et de la biodiversité ». Le concept de terroir conjugue donc les effets des facteurs environnementaux du milieu et ceux d'un certain nombre de pratiques agronomiques et œnologiques (facteurs humains). L'interaction de ces facteurs contribue à amplifier ou à atténuer les caractéristiques des vins liées au cépage. Tel qu'il est défini, le concept de terroir ne se réfère pas à un espace figé comme cela lui était trop souvent reproché, mais au contraire à un espace dynamique autorisant les évolutions de pratiques et de typicité des produits.

L'accentuation du changement climatique au-delà de 2050 pourrait poser la question de la pérennité de certains vignobles (Hannah *et al.*, 2013). Les faits montrent qu'il n'en est rien (Van Leeuwen *et al.* 2013) ; selon Hannah *et al.*, (2013) dans plusieurs régions viticoles françaises, certains cépages (le Pinot noir en Bourgogne, le Riesling en Allemagne ou la Syrah en Côtes du Rhône) devraient avoir déjà disparu car ils ne correspondent plus aux optimums climatiques qui les caractérisent, or ils sont toujours là. La pérennité d'un vignoble dépend de bien d'autres facteurs que le climat ; les aspects socio-économiques et humains jouent un rôle majeur dans les dynamiques territoriales. D'un point de vue agronomique, la pérennité d'un vignoble face aux aléas climatiques peut être assurée de multiples manières sans en modifier obligatoirement les contours géographiques : adaptation fine des pratiques annuelles d'entretien du sol et de gestion du feuillage à la diversité des unités de terroirs, relocalisation des parcelles sur le territoire en fonction de l'altitude, de l'orientation et de la profondeur et réserve en eau des sols, changement de l'encépagement, modification de la réglementation ... Par ailleurs, force est de constater que des cépages nobles français sont cultivés avec succès dans de nombreuses régions viticoles de l'hémisphère sud, dans des conditions de température bien supérieures à celles de leur région française d'origine. A titre d'exemple, il convient de citer les cépages chenin et sauvignon blanc (Carey *et al.*, 2008) dans la province du Cap en Afrique du sud. Pérennité du vignoble ne signifie nullement maintien des types de vins qui y sont produits. Des exemples récents montrent que des vignobles ont su évoluer. En Allemagne, les cépages rouges gagnent du terrain dans la vallée du Rhin et cela est attribué au changement climatique qui permet maintenant de les y cultiver ; en Val de Loire, le Saumurois s'est forgé une réputation sur les vins rouges au détriment des vins blancs au cours des dernières décennies, pour des raisons de stratégie commerciale, même si l'on peut constater que l'évolution du climat y a contribué.

Stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles et spatiales

La question de l'adaptation de la viticulture au changement climatique a fait l'objet de plusieurs publications récentes (Barbeau *et al.*, 2014b ; Viguié *et al.*, 2014 ; Duchêne *et al.*, 2014 ; Ollat et Touzard, 2014 ; Ollat *et al.*, 2014).

La vigne est une plante pérenne dont la durée de vie peut correspondre à deux générations de viticulteurs. Dans chaque région viticole, sa culture sur plusieurs siècles a permis de faire émerger des cépages emblématiques qui, seuls ou en assemblage, donnent des types de vins reconnus au niveau national et international. Chaque région viticole est caractérisée par une grande diversité de sols, topo et méso-climats, ainsi que des environnements paysagers. Ceci se traduit par une variabilité du fonctionnement de la vigne en termes de précocité de son cycle annuel, régime d'alimentation hydrique et vigueur. A pratiques agronomiques identiques, à la récolte, un même cépage va produire des vendanges de qualité différente qui donneront des vins différents, parfois sur des distances de quelques centaines de mètres. Ceci a amplement été démontré au cours des études « terroirs » conduites en moyenne vallée de la Loire à la fin du XXème siècle (Morlat, 2001). Des pratiques agronomiques adaptées à chaque unité de terroir permettent d'atténuer ces différences et de rattacher tous les vins produits à un type, au sein d'une même appellation d'origine protégée.

La diversité climatique à l'échelle de petits territoires a commencé à être étudiée dans le cadre des projets internationaux ANR TERVICLIM⁶ dès 2007 et GICC TERADCLIM⁷ à partir de 2009 (Quénol et Bonnardot, 2014), à l'aide de dispositifs d'enregistrement de la température prenant en compte des différences d'altitude, d'exposition, de pente et même de sol, sur plusieurs sites pilotes, notamment en France (Val de Loire) et Amérique du sud (Argentine, province de Mendoza et Uruguay, province de Montevideo). Ces sites d'Amérique du sud sont particulièrement intéressants car ils concernent respectivement des vignobles en climat semi-désertique chaud et en situation océanique tempérée chaude, scénarii possibles du futur lointain. Les travaux se poursuivent actuellement dans le cadre des projets français ACCAF/LACCAVE⁸ et européen LIFE-ADVICLIM⁹. Les mesures climatiques y sont mises en relation avec les caractéristiques physiques des sols de plusieurs parcelles témoins des sites pilotes ainsi que le comportement de la vigne en termes de précocité des stades phénologiques et qualité de la vendange : Val de Loire (Neethling *et al.*, 2012b), Uruguay (Fourment *et al.*, 2013), Argentine (Grassin *et al.*, 2014). Les études conduites sur les deux sites pilotes en Val de Loire ont la chance d'être imbriquées dans des études plus vastes conduites au niveau sub-régional (Anjou-Saumurois) et régional (ensemble du Val de Loire) (Bonneyoy *et al.*, 2012b, Neethling *et al.*, 2012a). Les résultats obtenus sur chaque site pilote montrent que la variabilité locale du climat et la variabilité de la composition du raisin sur une année y sont du même ordre de grandeur que celles que l'on trouve au niveau de la grande région viticole, mais également du même ordre de grandeur que les évolutions de température et de composition des raisins constatées depuis une trentaine d'années. Un petit territoire viticole constitue donc un véritable microcosme qui peut servir de laboratoire pour étudier in situ les évolutions de pratiques en

lien avec le changement climatique. C'est une échelle privilégiée qui permet de dialoguer avec les viticulteurs eux-mêmes et de comprendre comment ils se sont adaptés à des événements climatiques exceptionnels dans le passé et comment ils envisagent l'avenir.

Les enquêtes conduites en 2012 et 2013 auprès des vignerons des sites pilotes de Coteaux du Layon et Saumur-Champigny en moyenne vallée de la Loire montrent bien qu'ils sont plus préoccupés par le court terme que par le long terme. Les adaptations qu'ils envisagent en relation avec le changement climatique portent principalement sur les pratiques annuelles : date et moment de la vendange, transport des raisins à la cave, maîtrise des fermentations, protection phytosanitaire, entretien du sol ... La gestion de la vendange est prioritaire (Figure 4). Certains mettent en avant l'existence de cycles climatiques ainsi que les limites imposées par la réglementation. A partir de leurs réponses, il est possible de classer les stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles (Figure 5), sachant que, dans le détail, elles diffèrent selon la nature du sol, le cépage (sensibilité au stress hydrique) et le système de commercialisation, d'où l'intérêt de ces études aux échelles locales.

Les stratégies à court terme sont déjà mises en œuvre car elles permettent de répondre annuellement à la variabilité du climat. En particulier, la gestion de la vigueur et du rendement (type de taille, ébourgeonnage, épamprage, rognage, effeuillage, éclaircissage des grappes) et l'entretien du sol (travail du sol sous le rang et/ou dans l'inter-rang, apport d'engrais minéraux et/ou d'amendements organiques, maîtrise de l'enherbement) constituent les pratiques agronomiques de base de tout viticulteur. Elles sont adaptées aux conditions climatiques de l'année mais leur réalisation en dépend aussi fortement (Fig. 1). Les progrès réalisés ces dix dernières années dans la mise au point d'outils mécaniques de précision pour l'entretien du sol en vignobles sous le rang (socs décavailleuses, lames bineuses et outils rotatifs intercepts,...) et dans l'inter-rang (décompacteurs, cultivateurs à dents rigides ou vibrantes, rouleaux écraseurs de végétaux...) facilite grandement l'organisation du travail pour intervenir dans les conditions les plus propices. L'ensemble de ces pratiques annuelles vise à assurer une vendange de qualité. En années particulièrement chaudes ou sèches, représentatives de scénarii climatiques du futur proche, un entretien adéquat du sol et de la canopée constituent des leviers d'adaptation au changement climatique, même si le viticulteur n'en est pas conscient.

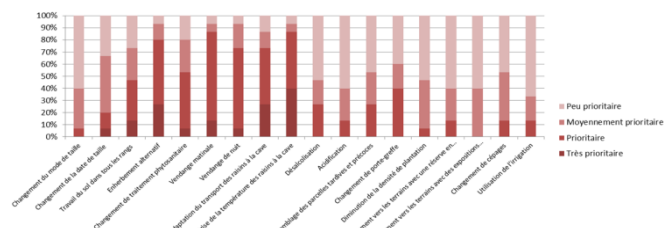


Figure 4 : Priorités dans les systèmes d'adaptation envisagés par les viticulteurs en AOP Saumur-Champigny (Petitjean, 2013)

Figure 4 : Priorities in the adaptation systems according to the winegrowers of the AOP Saumur-Champigny (Petitjean, 2013)

⁶ TERVICLIM : Observation et modélisation spatiale du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique

⁷ TERADCLIM : Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles

⁸ ACCAF / LACCAVE : Adaptation au changement climatique de l'agriculture et la forêt / Long-term adaptation to climate change in viticulture and enology.

⁹ ADVICLIM: Adaptation of viticulture to climate change : High resolution observations of adaptation scenarii for viticulture

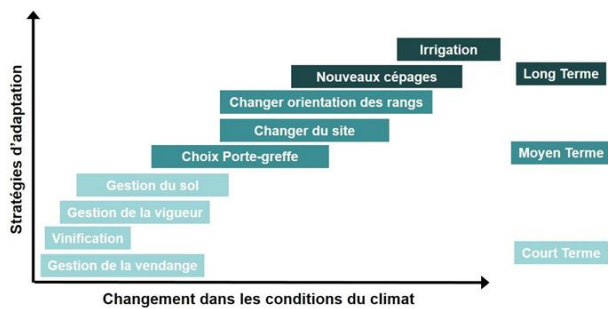


Figure 5 : Stratégies d'adaptation temporelles au changement climatique selon les réponses des vigneronnes en Coteaux du Layon et Saumur-Champigny
 Figure 5 : Temporal adaptation strategies to future climate change based on wine grower responses from Coteaux du Layon and Saumur-Champigny

Les stratégies à moyen terme ne peuvent être réalisées qu'à l'occasion de plantations nouvelles. Compte-tenu des incertitudes sur l'évolution des précipitations, les viticulteurs restent très prudents dans leurs choix. La seule évolution constatée aux échelles locales est dans le choix du porte-greffe pour une meilleure adaptation aux conditions de sol. Ceci est rendu possible grâce à une meilleure connaissance des propriétés du sol et du sous-sol, là où existe une cartographie des terroirs viticoles (Goulet et Morlat, 2011). Ce seul choix constitue déjà un progrès considérable quand on sait que plus de la moitié des porte-greffes en place n'est pas adaptée au type de sol. La cartographie des terroirs doit permettre d'aller plus loin car elle informe sur le potentiel viticole des parcelles, même si elles ne sont pas plantées en vigne. Il est donc possible d'en tenir compte au moment des nouvelles plantations et choisir celles qui présentent les meilleures conditions d'altitude, exposition et réserve en eau.

Les stratégies à long terme, elles, sont fortement dépendantes de l'évolution de la réglementation. Elles font encore l'objet de discussions même si certaines comme l'irrigation¹⁰ a déjà sa place dans le vignoble méditerranéen. L'alimentation hydrique de la vigne est un élément déterminant des terroirs viticoles et de la typicité des produits (Van Leeuwen *et al.*, 2009 ; Coulon-Leroy *et al.*, 2014). En France, de nombreuses études sur l'irrigation de la vigne ont été conduites ces dix dernières années par l'IFV¹¹ et les chambres d'agriculture de la région méditerranéenne. D'autres études de l'INRA de Pech-Rouge près de Narbonne concernent le pilotage de l'irrigation en fonction de la période de l'année et du niveau de contrainte hydrique ainsi que l'utilisation d'eaux usées pour l'irrigation (Ojeda, 2014). L'irrigation d'appoint est certes une option à envisager dans d'autres vignobles français que le vignoble méditerranéen, là où la fréquence des sécheresses estivales est supérieure à 3 années sur 10 et où la vigne est implantée sur des sols superficiels à faible réserve hydrique, à condition toutefois que la dispersion du parcellaire et la ressource en eau ne soient pas des facteurs limitants. L'exemple de vignobles du sud de l'Australie est là pour rappeler que l'irrigation systématique de la vigne peut entrer en conflit avec d'autres usages de l'eau pour les activités humaines.

Le changement de cépages est une stratégie à long terme mentionnée non seulement dans nos enquêtes, mais également dans beaucoup de travaux concernant d'autres régions viticoles du monde. Déjà au début des années 2000, cette option était envisagée chez les viticulteurs allemands, mais pas chez les français et italiens beaucoup plus contraints par des aspects réglementaires liés aux signes de qualité des produits d'appellation d'origine protégée (Battaglini *et al.*, 2009). C'est une option qui revient également dans les pays viticoles du sud (Barbeau *et al.*, 2014b). Le changement de cépages consiste en l'introduction progressive dans une région viticole de matériel végétal provenant de l'étranger ou d'autres régions viticoles, privilégiant des caractères de durée de cycle, besoins thermiques, plus grande résistance à la contrainte hydrique, plus faible sensibilité aux maladies ou encore maturité atteinte à un degré alcoolique potentiel faible à modéré. Ces cépages déjà cultivés ailleurs bénéficient de solides références concernant leur comportement agronomique et il est donc relativement aisé de modéliser leurs performances dans une autre région en se basant sur les conditions climatiques actuelles et futures. L'introduction de cépages tolérants ou résistants aux maladies cryptogamiques – « hybrides producteurs directs¹² » (HPD) du siècle dernier et autres croisements récents entre espèces des genre *Vitis* et *Muscadinia* (ICV, 2013 ; Schneider *et al.*, 2013) - peut apporter des solutions à la question du changement climatique car parmi eux on trouve une grande gamme de variabilité en termes de précocité et durée de cycle, composition des baies à la vendange. Ils pourraient prendre une part importante de l'encépagement dans le futur lointain si la réglementation sur l'utilisation des pesticides devient extrêmement contraignante, sous réserve aussi qu'ils soient acceptés par les consommateurs.

Richesse et complexité des approches

Les évolutions de pratiques annuelles et pérennes à long terme dépendent d'autres facteurs que climatiques. Les aspects réglementaires, socio-économiques et l'introduction d'innovations techniques ou organisationnelles sont souvent déterminants. C'est pourquoi des travaux de recherche sur la modélisation des activités humaines au niveau d'un territoire viticole sont importants à développer (Neethling *et al.*, 2013b), car ils tiennent compte des dynamiques locales dans un contexte plus global, avec la possibilité de se projeter dans l'avenir. C'est pourquoi aussi il est important de conduire avec les techniciens régionaux des expérimentations sur vignes en place pour tester des systèmes de production innovants basés sur la combinaison simultanée de différentes pratiques ou encore de planter des parcelles expérimentales complètement en rupture, en faisant le choix de nouvelles variétés en cours de création non inscrites au catalogue officiel (Lafond, 2012). Qu'elles soient à court, moyen ou long terme, les adaptations se raisonnent également à différentes échelles

¹⁰ L'irrigation de la vigne en France est régie par le décret n° 2006-1527 du 4 décembre 2006 qui stipule ses conditions de mise en œuvre

¹¹ Institut français de la vigne et du vin

¹² Variétés de vigne obtenues par croisements entre vignes européennes (*Vitis vinifera*) et vignes américaines (*Vitis riparia*, *Vitis labrusca*, ...) ou encore asiatiques (*Vitis amurensis*)

spatiales imbriquées les unes dans les autres. Un viticulteur possède généralement plusieurs parcelles de vigne. Celles-ci présentent la plupart du temps des conditions édapho-climatiques variées, même à l'échelle d'un petit territoire, ce qui implique que la réalisation de certaines pratiques annuelles n'aura pas toujours lieu sur toutes les parcelles et pas toujours en même temps. Par ailleurs, une pratique pérenne comme le choix du porte-greffe doit être adapté à la parcelle ; il est rare qu'un seul porte-greffe convienne à toutes les parcelles d'une même exploitation. C'est pourquoi l'adaptation des pratiques doit être raisonnée non seulement à l'échelle de la parcelle, mais à celle de l'exploitation. Elle a des conséquences importantes sur le choix du matériel à utiliser et l'organisation du travail. Enfin, une exploitation viticole s'insère dans un territoire où la plupart du temps sont présents d'autres vigneronnes et d'autres acteurs pour lesquels un certain nombre de préoccupations concernant l'évolution des pratiques sont partagées. Cela implique que certains choix doivent être concertés, particulièrement dans le cadre coopératif, que ce soit pour l'utilisation en commun de matériel d'entretien du sol ou de gestion de la canopée, ou encore pour l'encépagement en lien avec la stratégie de commercialisation du collectif. Il y a donc là une troisième dimension spatiale à prendre en compte, celle du territoire.

Il est cependant fort probable que, sous des contraintes réglementaires, environnementales ou climatiques, des innovations qui ne sont même pas imaginées actuellement surviendront au cours des prochaines décennies et feront évoluer les pratiques agronomiques sur le long terme dans des directions qu'il est difficile de prévoir aujourd'hui.

Bibliographie

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 2007, seconde session "climat et terroir"*, communication orale, 96-101.

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-days modelling. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 2014, 48, 141-152.

Barbeau, G., Goulet, E., Neethling, E., Ollat, N. et Touzard, J.M., 2014. Les méthodes d'adaptation au changement climatique. in Quénol, H. (coordinateur), *Observation et modélisation du changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles*. Tec & Doc Lavoisier (Ed.) Paris. 2014. 460 pp.

Battaglini, A., Barbeau, G., Bindi, M., Badeck, F.W., 2009. European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change*, 9 (2), 61-73.

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.

Bohmrich, R., 1996. Terroir: Competing perspectives on the roles of soil, climate and people. *Journal of Wine Research*, Vol 7, n° 1, 33-46.

Bonnefoy, C., Quénol, H., Planchon, O., Barbeau, G., 2010. Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo* numéro 14 (2010). Septembre 2010 - Novembre 2010. Editeur : UMR 8586 PRODIG. <http://echogeo.revues.org/12146>.

Bonnefoy, C., Barbeau, G., Quénol, H., Neethling, E., Madelin, M., Joannon, A., 2012a. Changement climatique et viticulture : le cas du Val de Loire. 325-341. In Mérot, P., Dubreuil, V., Delahaye, D.,

Desnos, P., 2012. *Changements climatiques dans l'Ouest. Evolutions, impacts, perceptions*. Presses universitaires de Rennes 2012. Collection Espaces et Territoires. 458 pp.

Bonnefoy, C., Quénol, H., Bonnardot, V., Barbeau, G., Madelin, M., Planchon, O. and Neethling, E., 2012b. Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*. 33, 4.

Carey, V.A., Archer, E., Barbeau, G., Saayman, D., 2008. Viticultural terroirs in Stellenbosch, South Africa. II. The interaction of Cabernet Sauvignon and Sauvignon blanc with environment. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, 2008, 42, n°4, 185-201.

Cossu, A., Battaglini, A., Bindi, M., 2004. Analisi dei possibili effetti dei Cambiamenti Climatici sulle caratteristiche produttive di una area della Sardegna ad alta vocazione viticola. *Inf Med* 33:85-88.

Coulon-Leroy, C., Neethling, E., Cadot, Y., Barbeau, G., 2014. L'eau : déterminant du terroir et de la typicité des produits. *Carrefours de l'Innovation agronomique : viticulture et stress hydrique*. Montpellier 17 juin 2014.

Dry, P.R., 1988. Climate change and the Australian grape and wine industry. *Aust Grapegrower Winemaker*. December 14-15, Winetitles, Adelaide.

Duchêne, E., Schneider, C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron 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. *Climate research*, 41(3), 193.

Duchêne, E., Huard, F., Pieri, P., 2014. Grapevine and climate change : what adaptations of plant material and training systems should we anticipate ? *Special Laccave, J. Int. Sci. Vigne Vin*, 2014, 59-67.

Fourment, M.; Ferrer, M.; González-Neves, G.; Barbeau, G.; Bonnardot, V.; Quénol, H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry composition at terroir scale in Uruguay. *Ciência y Técnica Vitícola*, 28, 1, 329-334.

Ganichot, B., 2002. Évolution de la date des vendanges dans les Côtes-du-Rhône méridionales. In: *Actes des 6e Rencontres rhodaniennes*. Institut rhodanien, Orange, p 38-41.

- Garcia de Cortazar-Atauri, I., 2006. *Adaptation du modèle STICS à la vigne (Vitis vinifera L.) : utilisation dans le cadre d'une étude d'impact du changement climatique à l'échelle de la France*. Ph.D. Thesis, École Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier, France.
- Goulet, E., Morlat, R., 2011. 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.
- Grassin, M., Quénot, H., Trapateau, L., Pinson, L., Barbeau, G., Loussert, P., Corgne, S., 2014. Spatial variability of the climate at fine scales and wine characteristics: example of the Alta Vista vineyard (Argentina). *Xth International Terroir Congress*, 7-10 July, Tokaj and Eger, Hungary.
- Hannah, L., Roehrdanz, P.R., Ikegami, M., Shepard, A.V., Shaw, M.R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P.A., Hijmans, R.J., 2013. Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, doi/10.1073/pnas.1307927110. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1210127110.
- Hawkins, E., Sutton R., 2012. Time of emergence of climate signals. *Geophysical Research Letters*, 2012, vol. 39, no 1.
- ICV, 2013. *Les cépages résistants aux maladies cryptogamiques : panorama européen*. Rousseau J. et Chanfreau S. Coordinateurs. Ed. Groupe ICV, mars 2013, 212 p.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Ulu4Tz8udZi>.
- Jones, G.V., White, M.A., Cooper, O.R., Storchmann, K. 2005. Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change* 73(3): 319-343.
- Jones, G.V., 2006. Climate change and wine: observations, impacts and future implications. *Wine Industry Journal* 21(4): 21-26.
- Jones, G.V., 2007. Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production. *Practical Winery and Vineyard*, July/August : 44-64.
- Kenny, G.J., Harrison, P.A., 1992. The effects of climate variability and change on grape suitability in Europe. *J Wine Res* 3:163-183.
- Lafond, D., 2012. Concevoir de nouveaux systèmes viticoles à faible utilisation d'intrants phytosanitaires : la démarche EcoViti. *Mondiaviti*, 28 Novembre.
- Laget, F., Tondut, J.L., Deloire, A., Kelly, M., 2008. Climate trends in a specific Mediterranean viticultural area between 1950-2006. *J Int Sci Vigne Vin* 42:113-123.
- Lebon, E. 2002. Changements climatiques : quelles conséquences prévisibles sur la viticulture. *Actes des 6e Rencontres rhodaniennes*, Institut rhodanien, Orange, 31-36.
- Madelin, M., Bois, B., Chabin, J.P., 2010. Modification des conditions de maturation du raisin en Bourgogne viticole liée au réchauffement climatique. L'exemple des vignobles de la Côte et des Hautes-Côtes de Beaune. *EchoGéo* (online) 14. <http://echogeo.revues.org/12176>.
- Meehl, G. A., Goddard, L., Murphy, J., Stouffer, R. J., Boer, G., Danabasoglu, G., Stockdale, T. 2009. Decadal prediction: can it be skillful?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(10), 1467-1485.
- Mori, K., Goto-Yamamoto, N., Kitayama, M., Hashizume, K., 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *J. Exp. Bot.*, 58: 1935-1945.
- Morlat, R., 1998. Les relations entre le terroir, la vigne et le vin. *Compte Rendu Académie d'Agriculture de France*, 2, 19-32.
- Morlat, R., 2001. *Terroirs viticoles : études et valorisation*. Collection avenir œnologie. Edité par œnoplurimédia sarl à Chaintre. 117 p.
- Neethling, E., Barbeau, G., Bonnefoy, C., Quénot, H., 2012a. Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Climate Research* 53:89-101.
- Neethling, E., Sicard, S., Barbeau, G., Bonnefoy, C., Quénot, H., 2012b. Spatial variability of temperature and grapevine growth at terroir scales in the context of climate change. *IXe Congrès International des Terroirs Viticoles*, Reims-Dijon, France. 25-29 juin 2012.
- Neethling, E., Coulon, C., Barbeau, G., Courtin, V., Bonnefoy, C., Quénot, H., 2012c. Viticultural strategies to adapt to climate change: Temporal and spatial changes in land use and crop practices. *Xth European IFSA Symposium*, Aarhus, Danemark. 01-04 juillet 2012.
- Neethling, E., Barbeau, C., Quénot, H., Barbeau, G., 2013a. Study on the sensitivity and adaptability of viticultural practices: winegrowers responses to climate variability. *Proceedings of 18th International Symposium GiESCO*. 7th to 11th July. Porto, Portugal.
- Neethling, E., Barbeau, G., Quénot, H., Rouan, M., Tissot, C., 2013b. Adapting to climate change: A case study on modeling viticultural farming practices under spatial and temporal constraints. *Climate Change and Regional Response*, 2013 (communication orale).
- Ojeda, H., 2014. L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Carrefours de l'Innovation agronomique : viticulture et stress hydrique*. Montpellier 17 juin 2014.
- Ollat, N., Touzard, J.M., 2014. Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry. *Special Laccave, J. Int. Sci. Vigne Vin*, 2014, 69-74.
- Ollat, N., Quénot, H., Barbeau, G., Van Leeuwen, C., Darriet, P., Garcia de Cortazar Atauri, I., Ojeda, H., Duchêne, E., Lebon, E., Vivin, P., This, P., Sablayrolles, J.M., Teil, G., Lagacherie, P., Giraud-Héraut, E., Neveu, P., Touzard, J.M., 2014. Adaptation to climate change: which are the main challenges for the French wine industry? *South African Society for Enology and Viticulture*. South Africa, 2014.
- Petitjean, T., 2013. Adaptation de la viticulture face au changement climatique : étude de la variabilité agro-climatique et de la dynamique des pratiques culturales à l'échelle fine de

- l'AOP Saumur-Champigny. *Mémoire de Master 2*, Université de Strasbourg, France.
- Philippe, F., Sturman, A., Quénot, H., 2014. Variabilité spatiale des températures dans le contexte du changement climatique à l'échelle du vignoble de Marlborough (Nouvelle-Zélande). *Climatologie*, vol. 10 (2013), 123-145.
- Quénot, H., Bonnardot, V., 2014. A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*. 23-32.
- Ramos, M.C., Jones, G.V., Martínez-Casasnovas, J.A., 2008. Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain. *Climate Research*, 38: 1-15.
- Sadras, V.O., Petrie, P.R., Moran, M.A., 2013. Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titratable acidity and wine sensory attributes. *Aust. J. Grape Wine Res.*, 19, 107-115.
- Rochard, J., Zaba, S., Chevre, C. 2010. Evolution du climat et viticulture. Analyse de la perception des professionnels et des experts. *Congrès de l'OIV*. Tbilissi, Géorgie.
- Schneider, C., Prado, E., Onimus, C., Ley, L., Forget, D., Barbeau, G., Merdinoglu, D., 2013. Création de nouveaux cépages, résistants aux maladies cryptogamiques, pour s'adapter au contexte environnemental. *Les rendez-vous de Techniloire: le matériel végétal d'aujourd'hui et de demain*. Fief de la Thoire, Juigné sur Loire, 15 novembre 2013. www.techniloire.com.
- Schultz, H.R., 2000. Climate change and viticulture: a European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Aust J Grape Wine Res* 6:2-12.
- Smart, R.E., 1989. Climate change and the New Zealand wine industry. Prospects for the third millenium. *Wine Ind J*. February 8-11.
- Solomon, A., Goddard, L., Kumar, A., Carton, J., Deser, C., Fukumori, I., Stockdale, T., 2011. Distinguishing the roles of natural and anthropogenically forced decadal climate variability: Implications for prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(2), 141-156.
- Stock, M., Badeck, F., Gerstengarbe, F.W., Kartschall, T., Werner, P.C., 2003. Weinbau und Klima-Eine Beziehung wechselseitiger Variabilitat. *Terra Nostra*, 422-426.
- 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.
- Tomasi, D., Jones, G.V., Giust ,M., Lovat, L., Gaiotti, F., 2011. Grapevine phenology and climate change: relationships and trends in the Veneto region of Italy for 1964–2009. *Am J Enol Vitic* 62:329-339.
- Van Leeuwen C., Bois B., Cellie N., Tregoat O., Roby JP., 2009. Les modifications de l'expression du terroir induit par les changements climatique nécessitent une adaptation du matériel végétal et des techniques viticoles. *Revue française d'oenologie*:10-14.
- Van Leeuwen, C., Seguin, G., 2006. The concept of terroir in viticulture. *J. Wine Research*, 17, 1-10.
- Van Leeuwen, C., Schultz, H.R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchêne, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.-P., Quénot, H., Touzard, J.-M., Malheiro, A.C., Bavaresco, L., Delrot, S., 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, doi/10.1073/pnas.1307927110.
- Van Leeuwen, C., Tregoat, O., Chone, X., Bois, B., Pernet, D., Gaudillere, J.P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purpose? *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* , 43, 121-134.
- Webb, L.B., Whetton, P.H., Barlow, E.W.R., 2008. Climate change and winegrape quality. *Australia. Clim Res* 36:99-111.
- Viguié, V., Lecocq, F., Touzard, J.M., 2014. Viticulture and adaptation to climate change. *Special Laccave, J. Int. Sci. Vigne Vin*, 2014, 53-58.
- Wilson, J.E., 1998. *Terroir: the role of geology, climate, and culture in the making of French wines*. 336 pp. University of California Press, Berkeley 94720.