

NATHALIE OLLAT ET JEAN-MARC TOUZARD

VIGNE, VIN ET CHANGEMENT CLIMATIQUE



éditions
Quæ

Nathalie Ollat
et Jean-Marc Touzard,
coordinateurs

VIGNE, VIN
ET CHANGEMENT
CLIMATIQUE

Éditions Quæ

Ouvrages sur la viticulture aux éditions Quæ

De l'œnologie à la viticulture (hors collection, 3^e édition augmentée)
A. Carbonneau, J.-L. Escudier (auteurs), P. Mauguin (préfacier), 2024, 336 p.

Les couleurs du vin. Une palette exquise (hors collection)
B. Valeur (auteur), 2023, 112 p.

Pesticides en viticulture. Usages, impacts et transition agroécologique
(collection Savoir-faire)
F. Macary (coord.), S. Le Foll (préfacier), 2023, 232 p.

Le vin. 60 clés pour comprendre l'œnologie (collection Clés pour comprendre)
F. Remize, V. Cheynier (auteurs), 2023, 152 p.

La vigne, miracle de la nature ? 70 clés pour comprendre la viticulture
F. Pelsy, D. Merdinoglu (auteurs), 2021, 176 p.

Pour citer cet ouvrage

Ollat N., Touzard J.-M., coord., 2024. *Vigne, vin et changement climatique*,
éditions Quæ, Versailles, 284 p.

Cet ouvrage a bénéficié du soutien financier de INRAE
(métaprogramme CLIMAE, départements ACT, AgroEcoSystem et Transform, BAP,
UMR EGFV et Innovation, référence 00000285-MP-P10183).

Ses versions numériques sont diffusées sous licence CC-by-NC-ND 4.0
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>).

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex
www.quae.com / www.quae-open.com

© Éditions Quæ, 2024
ISBN (papier) : 978-2-7592-3796-8
ISBN (PDF) : 978-2-7592-3797-5
ISBN (ePub) : 978-2-7592-3798-2

Sommaire

Remerciements	7
Préface	9
Introduction générale	13
Des évolutions climatiques inquiétantes	14
Le projet Laccave : une approche systémique et participative de l'adaptation	17
Les productions majeures du projet Laccave	21
Conclusion	23

PARTIE 1

De l'évaluation des impacts à l'étude des leviers d'adaptation

CHAPITRE 1

Des indicateurs et des modèles pour étudier les impacts du changement climatique sur la vigne	25
Introduction	25
Cadre historique du développement des modèles et indicateurs appliqués à l'étude de l'effet du climat	26
Travaux récents sur le développement d'indicateurs climatiques en viticulture	29
Travaux récents sur la modélisation de la vigne appliquée aux études du climat	34
Limites et perspectives	35

CHAPITRE 2

Les sols viticoles face au changement climatique	38
Introduction	38
Les spécificités des sols viticoles	40
Les fonctions et services associés aux sols viticoles	43
De la cartographie des terroirs à celle des fonctionnements	46
Conclusion	47

CHAPITRE 3

Effets de l'élévation des températures et du déficit hydrique sur la vigne	48
Introduction	48
Les effets marquants de l'augmentation de la température sur le comportement de la vigne	48
Les effets de l'augmentation de la contrainte hydrique	56
Les effets du changement climatique sur les bioagresseurs de la vigne	62
Conclusion	66

CHAPITRE 4

Les impacts sur la qualité du vin	67
Introduction	67
L'impact du changement climatique sur l'arôme des vins	68

L'impact du changement climatique sur la composante phénolique des vins	73
Conclusion	75

CHAPITRE 5

Idéotypes de vigne pour l'adaptation au changement climatique	76
Introduction	76
Quelle variabilité génétique pour l'adaptation ?	77
Conclusion	83

CHAPITRE 6

Modes de conduite et gestion des sols	86
Enjeux de la gestion du sol face au changement climatique	86
L'entretien du sol	89
Enjeux du mode de conduite pour l'adaptation au changement climatique	98
Les principaux systèmes de conduite de la vigne	102
Conclusion	104

CHAPITRE 7

La gestion de l'eau	106
Introduction	106
Le matériel végétal	107
La préparation et l'entretien du sol	109
Les systèmes de conduite	111
L'irrigation de la vigne, entre principes et réalité	112
Intégrer la viticulture à l'espace de gestion de la ressource en eau	115
Conclusion	117

CHAPITRE 8

Les solutions œnologiques : adapter la vinification	121
Introduction	121
Aménager les modalités de récolte	121
Optimiser la vinification	125
Ajuster les modalités d'élevage et les conditions de mise en bouteille des vins	129
Conclusion	130

CHAPITRE 9

La variabilité climatique à l'échelle du territoire comme levier d'adaptation	132
Introduction	132
Évaluer la variabilité climatique d'un territoire dans le contexte du changement climatique	133
Construire les projections du climat futur à l'échelle d'un territoire	137
Évaluer l'impact du changement climatique local en intégrant les pratiques viticoles	140
Vers une redistribution spatiale des espaces vitivinicoles ?	141
Conclusion	143

PARTIE 2

Coconstruire des stratégies pour l'adaptation

CHAPITRE 1

Perception du changement climatique et adaptation des viticulteurs	146
Introduction	146
Perception à l'échelle internationale du changement climatique et de ses impacts sur la viticulture	146
Stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles et spatiales	151
L'innovation au cœur de l'adaptation des viticulteurs au changement climatique	155
Conclusion	158

CHAPITRE 2

Le marché est-il preneur de vins marqués par le réchauffement climatique ?	160
Introduction	160
Une étude expérimentale pour mesurer les préférences des consommateurs	161
Résultats de l'expérimentation pour les deux groupes de consommateurs	164
Les enseignements de l'expérimentation	165
Conclusion	168

CHAPITRE 3

Construire des « écosystèmes d'adaptation » pour accompagner la viticulture française	169
Introduction	169
L'enjeu climatique dans l'analyse des systèmes d'innovation de la vigne et du vin	170
Une méthode mixte pour étudier les systèmes d'innovation régionaux des vignobles français	172
Les résultats des trois études sur les systèmes régionaux d'innovation et l'adaptation des vignobles	174
Conclusion	177

CHAPITRE 4

La construction des connaissances pour la formation	180
Introduction	180
La mise en place d'une formation à destination des enseignants des lycées viticoles	181
Un outil de cartographie interactive pour l'étude des terroirs dans le contexte du changement climatique	183
Une prospective agroclimatique réalisée par des élèves ingénieurs pour un territoire viticole	186
Vitigame, un jeu sérieux pour sensibiliser aux leviers de réduction des impacts environnementaux	191
Conclusion	193

CHAPITRE 5

Faire émerger l'action climatique à l'échelle locale : l'exemple des climathons viticoles	195
Introduction	195
Renouveler les démarches participatives à l'échelle locale : enjeu pour l'action climatique dans les vignobles	197
Développement d'une méthode « climathon » pour des communes agricoles	202
Résultats des climathons viticoles	207
Conclusion	213

CHAPITRE 6

Les modèles au service d'une démarche participative de construction de stratégies d'adaptation locales	217
Introduction	217
Les modèles mécanistes : incontournables mais insuffisants pour penser l'adaptation au changement climatique	217
La mobilisation de modèles au service de la réflexion des acteurs d'un vignoble méditerranéen	221
Opportunités et limites des modèles pour la construction participative de stratégies d'adaptation	227
Conclusion et perspectives	229

CHAPITRE 7

Prospective participative et stratégie nationale	231
Introduction	231
Outiller une démarche « interdisciplinaire » en utilisant les principes de la prospective	232
Des forums en région pour mettre en débat la prospective et susciter des propositions d'action	236
De la coconstruction d'une stratégie nationale à l'action dans les régions viticoles	239
Conclusion	241
Conclusion générale	243
La coconstruction de messages clés pour les acteurs de la filière	243
Vers une cogestion adaptative des vignobles, à plusieurs échelles	245
L'expérience d'une recherche transdisciplinaire, transformative et médiatique	246
Bibliographie	249
Liste des auteurs	279

Remerciements

Nous tenons à remercier sincèrement l'ensemble des structures qui ont contribué au financement de cet ouvrage : le métaprogramme INRAE-Climae/Accaf, les départements INRAE Biologie et amélioration des plantes, AgroEcoSystem, Transform, Act, ainsi que les unités mixtes de recherche Innovation et Écophysiologie et génomique fonctionnelle de la vigne.

Nous remercions également les scientifiques qui ont accepté d'en relire les différents chapitres et nous ont aidés à en améliorer la rédaction : Sylvain Bigot, Pierluigi Calanca, Marianne Cerf, Isabelle Cousin, Jean-Louis Drouet, Jean-Louis Durand, Lisette Ibanez, Marie-Hélène Jeuffroy, Pierre Labarthe, Pierre-Éric Lauri, Chantal Maury, José Queiro-Garcia, Natalia Quijada-Morin, Joël Rochard, Corinne Tanguy et Vivian Zufferey.





Préface

Le changement climatique est une réalité à laquelle l'humanité doit répondre de toute urgence dans de nombreux secteurs. Cependant, les initiatives politiques actuelles à l'échelle mondiale ne suffisent pas à provoquer un changement significatif visant à protéger le climat et à soutenir la durabilité. En tant qu'individus, nous ne disposons que d'options limitées (mais nous pouvons tout de même apporter notre contribution). Dans un contexte plus large, des changements infrastructurels, organisationnels et juridiques sont nécessaires pour évoluer vers un mode de vie à faibles émissions de carbone et éviter un réchauffement continu de la planète. En effet, de nombreuses initiatives visant à réduire les émissions de carbone sont vouées à l'échec ou ne permettront pas d'atteindre les objectifs fixés tant que la politique à l'échelle de la planète subventionne l'utilisation des énergies fossiles à hauteur d'environ 1 000 milliards de dollars américains par an ! Les questions de l'utilisation des énergies renouvelables, de la construction de bâtiments durables ou de la conservation de l'eau et de l'accès à celle-ci concernent l'ensemble de la population mondiale. Il devient de plus en plus clair que les humains sont extrêmement dépendants de la nature et des conditions météorologiques (et du climat à plus long terme).

Parmi tous les secteurs qui doivent mettre en œuvre des changements, l'agriculture est l'un des plus importants, car elle constitue la base de la production alimentaire. Le climat est un facteur décisif dans les productions agricoles, depuis l'adéquation géographique jusqu'aux effets sur le rendement et la qualité. Tout au long de l'histoire de l'humanité, ces liens forts ont déterminé le développement culturel et économique des régions, créé des identités locales et influencé les migrations et les lieux de sédentarisation. Dans le domaine de l'agriculture, ces liens trouvent leurs expressions les plus intenses dans la production de raisin et de vin. La vigne est cultivée depuis plusieurs milliers d'années et, au cours de cette longue histoire, des régions viticoles spécifiques sont apparues, dont les conditions climatiques ont joué un rôle décisif dans l'élaboration des caractéristiques spécifiques du vin issu de certains cépages. Au fil du temps, les paramètres climatiques (tels que la température) ont été utilisés pour délimiter ces régions viticoles et pour développer des cadres juridiques qui sont encore valides pour leur définition actuelle dans l'ensemble de l'Union européenne par exemple. L'« expérience européenne » a été utilisée comme modèle, dans la mesure où les indices climatiques de différentes régions viticoles d'Europe ont été appliqués aux régions du « Nouveau Monde » pour déterminer l'adéquation générale et le choix des cultivars.

Dans le contexte du changement climatique, l'agriculture et la viticulture contribuent également aux émissions de gaz à effet de serre et à la pollution de l'environnement. Mais il existe un potentiel d'atténuation de ces émissions, car les sols peuvent présenter d'importantes capacités de stockage de carbone. Dans le même temps, il

est important de reconnaître que la filière Vigne et vin doit réduire son empreinte environnementale bien au-delà de ses simples pratiques de culture, notamment à travers les processus de transformation de la matière première, l'emballage, la logistique et bien d'autres domaines.

Au sein de l'ensemble du secteur vitivinicole mondial, la filière Vigne et vin française est unique de par sa valeur économique, son impact social, ses réglementations strictes, la diversité des conditions mésoclimatiques (régionales), son idée de production basée sur le terroir, ses spécifications régionales en matière d'utilisation variétale, de méthodes culturelles et de types de produits conférant des identités régionales et locales avec une longue histoire. Préserver ce système dans un climat changeant et des conditions environnementales, sociales et économiques en évolution rapide constitue un défi énorme. Contrairement aux crises gérées précédemment, telles que celles de l'introduction du phylloxéra ou des maladies fongiques (oïdium et mildiou), où les agents responsables pouvaient être identifiés et combattus relativement rapidement, le changement climatique mondial se produit relativement lentement (à une échelle de plusieurs décennies). Il n'est pas immédiatement évident pour beaucoup (malgré ses signes d'accélération) et développera l'essentiel de son impact dans un avenir qui peut apparaître encore « lointain et incertain ». Il est donc d'autant plus important de convaincre l'ensemble du secteur, y compris toutes les parties prenantes et les consommateurs, qu'une réaction immédiate est nécessaire. Or, réagir dès aujourd'hui est plus urgent que pour les autres filières agricoles en raison de la longévité des plantations, qui fait que les vignes plantées aujourd'hui déterminent les vins qui seront produits en 2050-2070 et peut-être au-delà.

L'adaptation au changement climatique dans cette filière doit prendre en compte une diversité de conditions régionales, sociales et économiques. Elle présente aussi un large éventail de facettes techniques, institutionnelles et réglementaires (donc politiques) qui doivent être abordées pour élaborer une stratégie nationale, incluant toutes les parties prenantes et même, dans une certaine mesure, le grand public (comme les habitants des zones viticoles).

L'ouvrage *Vigne, vin et changement climatique* présente les résultats des travaux de Laccave (et même bien au-delà de ce projet), une compilation aussi unique que le système viticole français ! Au gré des chapitres se succèdent ainsi des analyses climatiques, la présentation d'outils de caractérisation des conditions environnementales et régionales, l'étude des déterminants génétiques, physiologiques et culturels de l'adaptation, l'identification des menaces sanitaires, l'analyse des réponses œnologiques, de celles des attentes des consommateurs ou de la perception des acteurs sur les conséquences socioéconomiques régionales, l'expérimentation de nouvelles démarches ou formations et, enfin, la formulation de mesures d'adaptation à différentes échelles de la filière Vigne et vin.

Cet ensemble de contributions complémentaires autour d'un vaste sujet est particulier, car il inclut un transfert bidirectionnel de connaissances de la science vers les acteurs de la filière et inversement, ce qui est très important pour garantir l'acceptation des résultats. Laccave est une « recherche pilote » originale et très complète. Il peut, à bien des égards, devenir un modèle pour les régions productrices de raisin et de vin dans le monde entier grâce à la diversité des méthodes et des outils utilisés, depuis les modèles climatiques et physiologiques (sciences naturelles) jusqu'aux modèles comportementaux,

aux approches participatives de type « climathons » (sciences sociales) et aux approches pédagogiques. C'est un exemple de la manière dont la science dans toutes ses dimensions peut agir avec les acteurs publics (aux échelles locale, régionale, nationale), les viticulteurs et la population locale pour élaborer un plan cohérent pour l'avenir. Et, bien entendu, le processus n'est pas encore terminé.

La transformation du système viticole pour renforcer la résilience de toute une filière face aux conditions climatiques futures est une tâche qui peut jouer sur les perceptions positives ou anxieuses du futur, et sur l'innovation : « les espaces viticoles devront-ils sortir de leurs frontières actuelles (devenir nomades)? », « faut-il changer quelque chose (ou avoir une attitude conservatrice)? », « l'innovation sera-t-elle centrale? » ou « faut-il libérer complètement le système (ce qui équivaldrait à détruire l'actuel système de régulation français)? ». Laccave a ainsi réussi à susciter l'élaboration d'une stratégie commune pour la filière à travers une démarche « démocratique ».

Le but n'est pas de s'adapter et de survivre pendant un certain temps avec un produit traditionnel vendu un certain prix. L'objectif est de montrer quels sont les moyens pour survivre à long terme, en incluant des solutions telles que l'agroécologie, la conservation des sols, la plantation de variétés tolérantes aux maladies, la gestion innovante de l'eau et de l'énergie, etc., et — le plus important — de s'impliquer directement dans la mise en œuvre de ces solutions et stratégies, à travers des actions pédagogiques et des démarches participatives. Parce que si nous ne parvenons pas à implanter le besoin de changement et les outils nécessaires pour y parvenir dans la tête des prochaines générations, nous ne parviendrons pas à gérer les crises climatiques.

Hans Reiner Schultz,
Président de l'université de Geisenheim (Allemagne)



Introduction générale

Nathalie Ollat et Jean-Marc Touzard

Le changement climatique est une réalité qui nous concerne tous et bouleverse les conditions de vie sur Terre. Rapport du Giec¹ après rapport du Giec — nous en sommes au sixième —, le constat devient de plus en plus alarmant et la nécessité d’agir une urgence absolue (IPCC, 2023). L’agriculture est aux premières loges, car ce secteur est à la fois très émetteur de gaz à effet de serre et très impacté du fait de ses dépendances au climat. Pour la filière Vigne et vin française, ces liens au climat sont primordiaux. Ils sont historiquement inscrits dans la notion de terroir et jouent un rôle important dans la localisation des vignobles, les choix des cépages et des pratiques, la définition des qualités des vins et l’organisation de leurs marchés (Dion, 1990). Le changement climatique vient donc bouleverser des équilibres construits au fil du temps, aux fondements d’une activité qui a une place si particulière dans l’économie et la société française (Ollat et al., 2020, 2021). Le défi est majeur pour l’ensemble des acteurs de cette filière, depuis les viticulteurs jusqu’aux consommateurs de vin, en passant par les chercheurs qui produisent des connaissances sur ses différentes composantes.

En France, l’épisode caniculaire de 2003 a amorcé une prise de conscience des enjeux du changement climatique, conduisant des chercheurs à engager des travaux sur le sujet dès 2004 (Ollat et al., 2020) et des acteurs de la filière Vigne et vin à soutenir cet effort de recherche ou à se mobiliser pour évaluer leur impact carbone. Parallèlement, les débats scientifiques et politiques plus globaux, notamment dans le cadre de conférences internationales telles que les COP (Conférences des parties), ont vite établi que les mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre ne suffiraient pas à endiguer le changement climatique et que l’adaptation devenait un enjeu majeur pour l’agriculture et l’alimentation (Soussana, 2013). C’est ainsi qu’en 2011 l’Institut national de la recherche agronomique (aujourd’hui INRAE) a mis en place un cadre de travail pluridisciplinaire appelé « Métaprogramme Accaf² » pour soutenir des projets sur l’adaptation au changement climatique de l’agriculture et de la forêt (Caquet, 2017). Des scientifiques travaillant sur la vigne et le vin, dont certains étaient déjà impliqués dans des projets sur le changement climatique, ont alors saisi cette opportunité pour proposer un projet intitulé *Laccave : Long term impacts and Adaptation to Climate ChAnge for Viticulture and Enology*. L’enjeu était avant tout de fédérer les travaux de recherche conduits en France sur le sujet et de rendre les résultats plus facilement disponibles aux acteurs de la filière (Ollat et Touzard, 2014). Après 10 ans d’activité (et deux rapports du Giec), le présent

1. Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat.

2. Adaptation au changement climatique des agrosystèmes et de la forêt.

ouvrage a comme objectif de faire le bilan des travaux réalisés, de proposer un état des connaissances sur le sujet et de rendre compte des approches ayant facilité la mobilisation des acteurs professionnels. Il veut être accessible à une large communauté de lecteurs, selon l'esprit participatif qui a animé Laccave depuis ses débuts. Il est structuré en deux grandes parties. La première rassemble neuf chapitres décrivant les impacts du changement climatique sur le fonctionnement de la vigne, les sols et la qualité des vins, puis les leviers techniques et géographiques d'adaptation : l'élaboration et le choix de nouvelles variétés, les modes de conduite, la gestion de l'eau, les solutions œnologiques, l'utilisation de la variabilité climatique d'un territoire pour réorganiser les plantations. La seconde partie est constituée de sept chapitres qui abordent la manière dont les acteurs de la filière construisent, avec les chercheurs, des connaissances et des stratégies, en combinant les différents leviers possibles : la perception des impacts par les viticulteurs et les consommateurs, le rôle des organisations professionnelles et de la recherche, de la formation, et les démarches participatives qui sont mobilisées pour faire émerger des solutions à l'échelle locale, concevoir de nouveaux systèmes viticoles, ou construire une stratégie nationale d'adaptation. Les deux parties offrent donc une grande diversité de contributions scientifiques, avec une attention particulière portée aux méthodes mobilisées. Chaque chapitre est enrichi d'encadrés décrivant plus en détail une expérimentation, un dispositif, un résultat ou un exemple d'action.

Des évolutions climatiques inquiétantes

Depuis le début du xx^e siècle, la concentration atmosphérique en CO₂ a augmenté de 40 % (419 ppm en 2023) et près de la moitié de cette augmentation concerne les 30 dernières années. Le réchauffement de l'air qui en découle est, en France, de près de +1,8°C en moyenne annuelle et il s'est accéléré depuis les années 1980, toutes les années depuis 1990 étant plus chaudes que la moyenne depuis 1900, et les années les plus chaudes étant 2014, 2018, 2020, 2022, 2023 (Météo-France, 2024, fig. Intro-1A). Cela induit également une augmentation de la température des sols jusqu'à 50 cm de profondeur (Schultz, 2022). Les précipitations annuelles ont par contre peu évolué, avec une légère tendance à l'augmentation dans le nord et à la baisse dans le sud, et des diminutions plus marquées selon les saisons et les régions. En zone méditerranéenne, le nombre de cycles où les précipitations hivernales (période de recharge des sols) sont inférieures à 200 mm a augmenté sur la période 1990-2021 (tableau Intro-1). Par ailleurs, un accroissement de l'évaporation potentielle du fait de l'augmentation des températures a été mis en évidence dans des vignobles situés à différentes latitudes en Europe (d'Avignon à Geisenheim en Allemagne), même si ce n'est pas de manière systématique (Schultz, 2017).

Par rapport à la période 1976-2005, le réchauffement devrait se poursuivre sans écart majeur entre les différents scénarios possibles d'émission d'ici 2050 (+1°C à 1,5°C). Il pourrait atteindre dans le sud-est de la France plus de 5°C à la fin du xxi^e siècle pour le scénario le plus pessimiste, avec une hausse spectaculaire du nombre de jours de canicule (Soubeyrou *et al.*, 2021 ; fig. Intro-1B et fig. Intro-2). L'évolution des précipitations reste caractérisée par une très forte incertitude (Zito, 2021 ; Ollat *et al.*, 2021). Une augmentation de la durée des épisodes de sécheresse météorologiques n'en est pas moins attendue dans les années à venir, notamment dans le sud et l'ouest de la France (Soubeyrou *et al.*, 2021). À l'échelle européenne, certaines simulations font état

Tableau Intro-1. Valeurs médianes de précipitations hivernales (octobre à mars) sur la période historique dans des sites viticoles français et différences entre la période avant 1990 et les trente dernières années. D'après N. Saurin, données AgroClim-INRAE.

	Début de la série	Médiane [...-1989] Recharge (mm)	Médiane [1990-2021] Recharge (mm)	Différence entre [1990-2021] - [...-1989] Recharge
Marseillan-Plage	1956	349,4	292,5	- 56,9
Gruissan	1962	403,6	319,9	- 83,8
Colmar	1973	213,2	233,3	20,1
Mauguio	1956	415,2	320,0	- 95,2
Montreuil-Bellay	1977	334,8	308,5	- 26,3
Fagnières	1971	312,3	295,1	- 17,2
Avignon	1968	362,2	354,0	- 8,2
Villenave-d'Ornon	1961	518,7	504,8	- 14,0

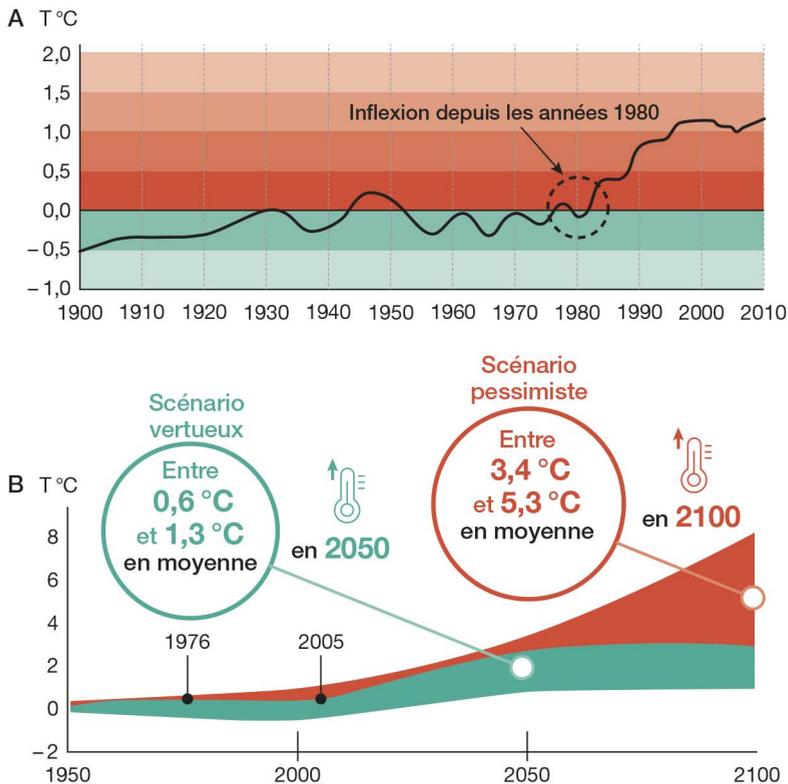


Figure Intro-1. Température moyenne de l'air en France depuis 1900 (A) et simulée pour le XXI^e siècle (B). On constate que cette température a augmenté de presque 1,8 °C depuis un siècle et qu'elle continuera à augmenter selon un rythme variable en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Les augmentations sont exprimées par rapport à la période de référence (1976-2005).

d'une augmentation de 10 à 30% de l'évapotranspiration réelle dès 2050, avec un bilan hydrique (pluie moins évapotranspiration potentielle [ETP]) qui pourrait être réduit de 120mm dans les régions méridionales (Cardell *et al.*, 2019). Ces projections sont confirmées par les travaux de Zito *et al.* (2023), qui constituent les plus récentes simulations d'indicateurs climatiques et bioclimatiques pour 21 régions viticoles françaises à la maille de 8 × 8km. Chaque augmentation de température accroît également la fréquence et l'intensité des événements extrêmes tels que les tempêtes et vagues de chaleur, avec des effets sur les risques d'incendie, la destruction d'infrastructures et d'écosystèmes, et des conséquences sur la santé humaine (IPCC, 2023). Ces dernières années illustrent parfaitement la gravité de la situation, que ce soit en France ou à l'international.

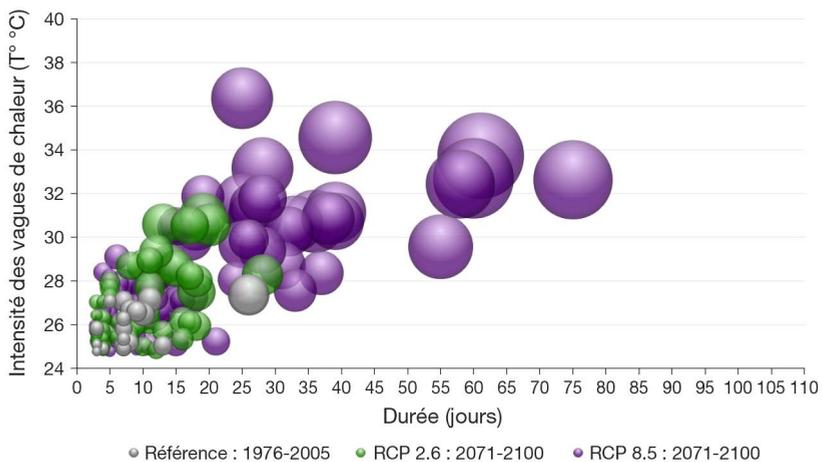


Figure Intro-2. Caractéristiques observées (période 1947-2018) et simulées (jusqu'en 2100) des vagues de chaleur annuelles pour différents scénarios et différents horizons. Source : Météo-France.

Déjà perceptibles depuis les années 1980, les conséquences attendues sur la vigne et le vin préoccupent fortement les acteurs de la filière : avancées des vendanges jusqu'à 20 à 30 jours d'ici la fin du *xxi*^e siècle (Zito *et al.*, 2023); accroissements possibles des risques de gel de printemps (Sgubin *et al.*, 2018; Bois *et al.*, 2023); augmentations de température pendant la période de maturation des raisins affectant leur potentiel œnologique (Madelin *et al.*, 2010; Van Leeuwen et Destrac-Irvine, 2017; Van Leeuwen *et al.*, 2022); modifications des risques liés aux maladies et ravageurs, même s'ils restent difficiles à prédire (Caubel *et al.*, 2014; Bois *et al.*, 2017; Zito, 2021); situations de sécheresse plus fréquentes et plus intenses avec des conséquences sur le rendement (Lebon et García de Cortázar-Atauri, 2014). Le constat et les projections sont plutôt inquiétants pour toutes les régions viticoles traditionnelles, où les viticulteurs craignent pour leur capacité à conserver des marchés et assurer leur durabilité économique. Cependant, dans certains vignobles, ces nouvelles conditions climatiques pourraient s'avérer moins pénalisantes, comme en Alsace (Duchêne et Schneider, 2004) et en Val de Loire (Touzard *et al.*, 2019), du moins jusqu'en 2050. Par ailleurs, de nouvelles potentialités viticoles apparaissent dans des régions où la viticulture est aujourd'hui marginale (Ollat *et al.*, 2016), par exemple en Bretagne (Zavlyanova *et al.*, 2023), laissant entrevoir la perspective d'une « nouvelle géographie viticole » à la fin du siècle.

Le projet Laccave : une approche systémique et participative de l'adaptation

La filière Vigne et vin présente des spécificités qui en font un objet d'étude scientifique original et d'intérêt pour explorer la question de l'adaptation au changement climatique. L'importance économique de la production de vin en France est en toile de fond, avec de nombreux emplois directs et indirects, ainsi qu'une position stratégique dans les exportations françaises (près de 15 milliards d'euros en 2022). Cette position est aussi culturelle avec des effets sur le tourisme et l'attractivité du pays. Le secteur est par ailleurs très organisé, réglementé autour du dispositif des appellations d'origine et indications géographiques protégées, qui cadre la localisation des vignobles, les technologies et pratiques des viticulteurs, les qualités et marchés du vin. Cette imbrication forte entre l'environnement, les techniques, l'économique et le politique fait que les innovations et les changements pour s'adapter appellent des regards interdisciplinaires et sont l'objet de négociations qui rendent plus explicites les enjeux d'orientation et de coordination au sein du secteur. De plus, l'importance des investissements de long terme, depuis la plantation jusqu'à des actifs immatériels comme la réputation d'un vin, amène les acteurs à se projeter dans plusieurs dizaines d'années, à l'horizon du changement climatique. Planter aujourd'hui une parcelle de vigne, c'est construire des connaissances pour envisager le vin qu'elle pourrait produire en 2050... Tous ces enjeux font de ce secteur à haute valeur ajoutée un système modèle pour analyser de manière pluridisciplinaire l'adaptation au changement climatique (Ollat et al., 2020).

Laccave a ainsi fédéré un réseau scientifique de 22 laboratoires rattachés à INRAE, au CNRS (Centre national de la recherche scientifique), à des universités et grandes écoles, présents dans les principales régions viticoles françaises et intégrant un large éventail de disciplines scientifiques, depuis la climatologie jusqu'aux sciences sociales, en passant par la génétique, la physiologie, l'agronomie, l'œnologie ou la pathologie. Ce réseau a aussi établi progressivement des collaborations avec FranceAgriMer, l'Inao, l'Institut français de la vigne et du vin, des ingénieurs des chambres d'Agriculture de France et des représentants des principales interprofessions viticoles françaises.

Les objectifs scientifiques du projet étaient à la fois d'explorer à long terme (2050) les impacts du changement climatique sur la culture de la vigne et la production de vin à des échelles régionales, et de construire des connaissances pour développer et évaluer des innovations et des stratégies permettant l'adaptation de ces vignobles. En accord avec les orientations du métaprogramme Accaf, les objectifs étaient également de structurer et rendre plus visible l'offre de recherche française sur ces questions, pour mieux répondre à la demande des acteurs de la filière et, plus largement, de diffuser les connaissances pour renforcer la mobilisation de ces acteurs et de la société sur la question du changement climatique.

En dix ans, Laccave a de fait réussi le pari de répondre à ces enjeux académiques, de structuration, d'expertise et de valorisation, avec une grande diversité d'actions et de productions. Cette dynamique positive a été permise par la durée même du projet. Des études ciblées sur différents domaines d'adaptation, depuis le matériel végétal jusqu'à l'analyse des comportements des consommateurs, ont pu être réalisées sur une période

suffisamment longue pour une plante pérenne et pour la prise en compte de l'affirmation de l'enjeu climatique par les acteurs de la filière. D'autres travaux plus méthodologiques ont produit des indicateurs, des outils ou modèles pour améliorer des simulations à l'échelle locale, évaluer les risques et raisonner l'adaptation. Des séminaires internes sous forme de *think-tank* ont permis de développer des réflexions plus systémiques sur des thématiques centrales associées à l'adaptation, comme la gestion de l'eau ou des sols. Des approches participatives ont progressivement été expérimentées pour faire émerger des solutions à une échelle locale, coconstruire des systèmes plus résilients, ou conduire une étude prospective débouchant sur l'élaboration d'une stratégie nationale d'adaptation de la filière. Enfin, le temps du projet a aussi été ponctué par des événements scientifiques ouverts aux acteurs de la filière, par exemple à l'occasion de salons professionnels, ou à la communauté scientifique internationale, avec notamment l'organisation de deux colloques internationaux et la construction de plusieurs projets européens.

Pour raisonner l'adaptation, Laccave a principalement ciblé l'horizon 2050, pour lequel les augmentations envisagées de température ne dépasseraient pas +2°C par rapport à la période de référence (1976-2005), même si plusieurs simulations climatiques à l'échelle locale ont aussi été conduites pour la fin du *xxi*^e siècle (Neethling, 2017; de Rességuier *et al.*, 2020; Zito, 2021; Zavlyanova *et al.*, 2023; Zito *et al.*, 2023). Avec cet horizon en perspective, les participants au projet ont aussi construit ensemble une vision commune, un cadre d'analyse et des méthodes permettant l'exercice de l'interdisciplinarité, nécessaire pour répondre au besoin de connaissance sur l'adaptation. Ils se sont ainsi rapidement accordés sur le fait que le changement climatique est un processus continu et multidimensionnel, que ses expressions futures ne peuvent être connues qu'avec beaucoup d'incertitudes et seront variables à l'échelle locale, que ses impacts sont globaux (notamment sur les ressources et les écosystèmes) et que l'adaptation doit être considérée au sens large, en incluant des processus biologiques pilotés par l'action humaine dans une diversité de domaines et à différentes échelles (Viguié *et al.*, 2014).

La communauté Laccave a ainsi adopté une définition commune de l'adaptation, considérée comme l'ensemble des processus et actions qu'une société, un territoire ou un secteur met en œuvre pour modifier ses activités face aux évolutions observées ou attendues du climat, en minimisant les effets négatifs de ce changement et en maximisant ses effets bénéfiques (Hallegatte *et al.*, 2011; IPCC, 2014; Caquet, 2017). L'adaptation doit ainsi se raisonner de manière systémique, en analysant les impacts, la vulnérabilité et les risques à différentes échelles spatiales et temporelles, en combinant des leviers techniques (Barbeau *et al.*, 2014), mais également en raisonnant la localisation des vignobles, en repensant les stratégies des entreprises et en considérant l'évolution du secteur à travers ses marchés, ses institutions, sa réglementation et le développement des connaissances techniques et scientifiques (Viguié *et al.*, 2014; fig. Intro-3). Il est apparu d'emblée qu'il n'y aurait pas de solution unique, par exemple seulement technologique, mais que différents leviers devraient forcément être combinés dans des stratégies pouvant s'orchestrer au sein d'un « système sectoriel d'innovation et d'adaptation » (Boyer et Touzard, 2021).

Globalement, Laccave a donc privilégié l'anticipation comme voie d'adaptation, plutôt que les réactions aux effets avérés du changement climatique (Viguié *et al.*, 2014). Le projet a également mis en avant l'importance des perceptions des risques et des conditions d'acceptation du changement par les acteurs de la chaîne de valeur (du producteur au consommateur), déterminantes pour leur engagement dans des stratégies adaptatives

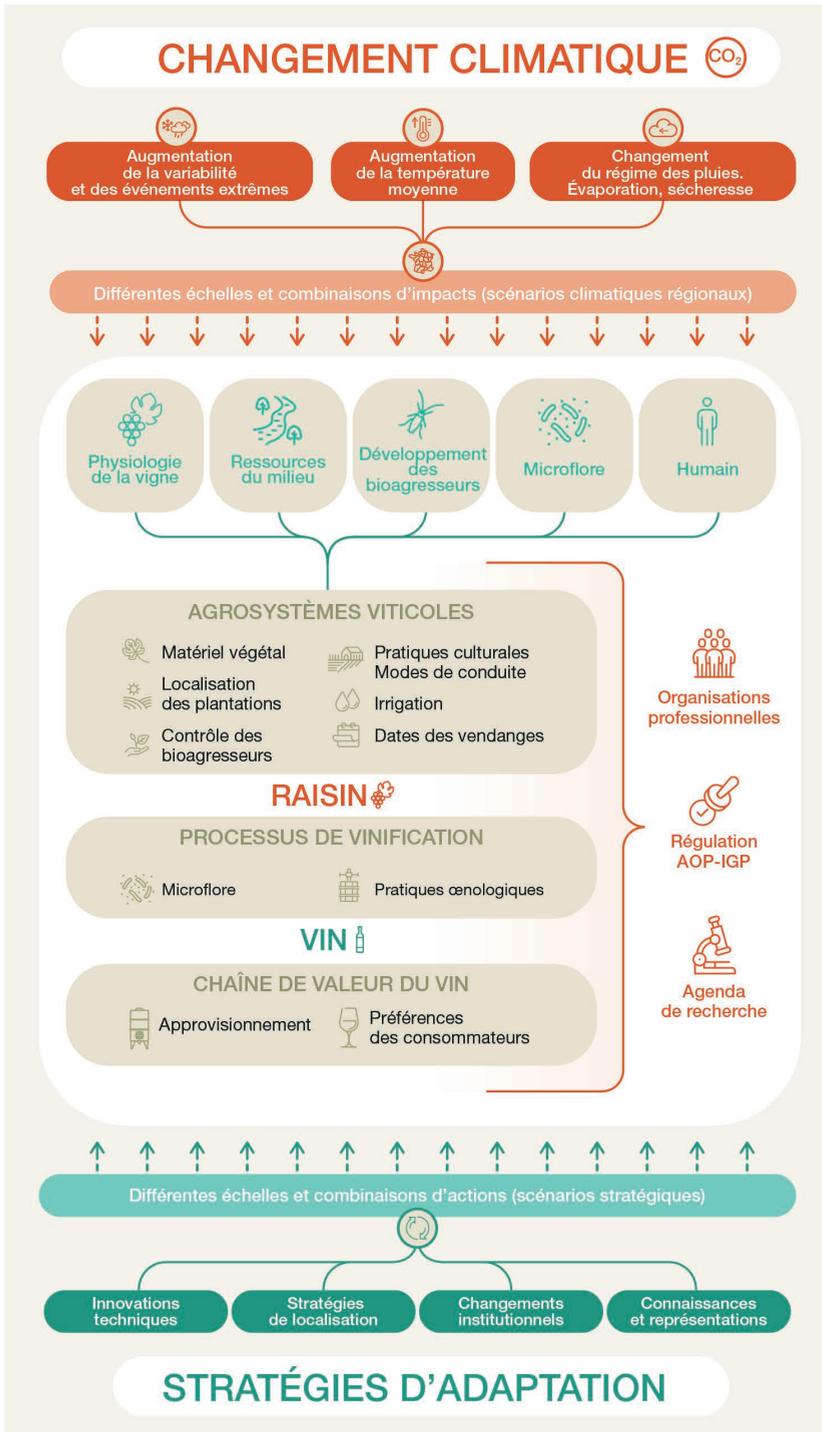


Figure Intro-3. Approche systémique de l'adaptation au changement climatique de la filière Vigne et vin, selon Laccave. Source : Ollat et Touzard, 2014.

(Teil, 2017 ; Neethling, 2017 ; Boyer et Touzard, 2021). Ces questions sont traitées dans les chapitres II-1 et II-2 du présent ouvrage. L'amplitude des changements considérés pour l'adaptation a aussi été prise en compte : les changements incrémentiels, comme la modification de pratiques culturales ou œnologiques, peuvent certes améliorer la résilience à court terme d'une exploitation viticole, mais leur enchaînement peut s'avérer insuffisant et conduire à des mal-adaptations sur le long terme (Viguié et al., 2014 ; Caquet, 2017). À court terme, il faut sans doute envisager des mesures « sans regret », définies comme celles qui présentent un intérêt quelle que soit l'ampleur du changement climatique. L'agroécologie et les pratiques agronomiques limitant l'érosion appartiennent à cette catégorie. La flexibilité et la réversibilité des moyens engagés pour l'adaptation sont aussi à prendre en compte, en s'appuyant par exemple sur une diversification des cépages ou en préférant des changements institutionnels, plutôt que d'investir dans des solutions technologiques coûteuses et risquant de « verrouiller » les systèmes techniques (Viguié et al., 2014). L'importance du temps long pour une culture pérenne et l'intensité des changements climatiques envisagés dans la seconde moitié du XXI^e siècle appellent enfin à considérer l'adaptation comme un processus continu, systémique et transformatif, pouvant mettre en œuvre des changements radicaux comme le renouvellement général de l'encépagement ou une relocalisation importante du vignoble français (Caquet, 2017 ; fig. Intro-4). Étant donné l'intensité et la rapidité des évolutions climatiques, ces transformations doivent être d'ores et déjà explorées et testées. Dans ces processus, le rôle des interactions et des échanges d'expérience entre les acteurs, scientifiques compris, est capital pour faciliter l'anticipation. Les recherches participatives deviennent indispensables pour produire des connaissances scientifiques utiles pour l'action dans un contexte d'urgence, d'incertitude et de multiplicité des leviers à considérer pour s'adapter. Ces démarches participatives ont été expérimentées à plusieurs reprises et à plusieurs échelles dans Laccave, et seront rapportées dans la seconde partie de l'ouvrage (chapitres II-5, II-6 et II-7).

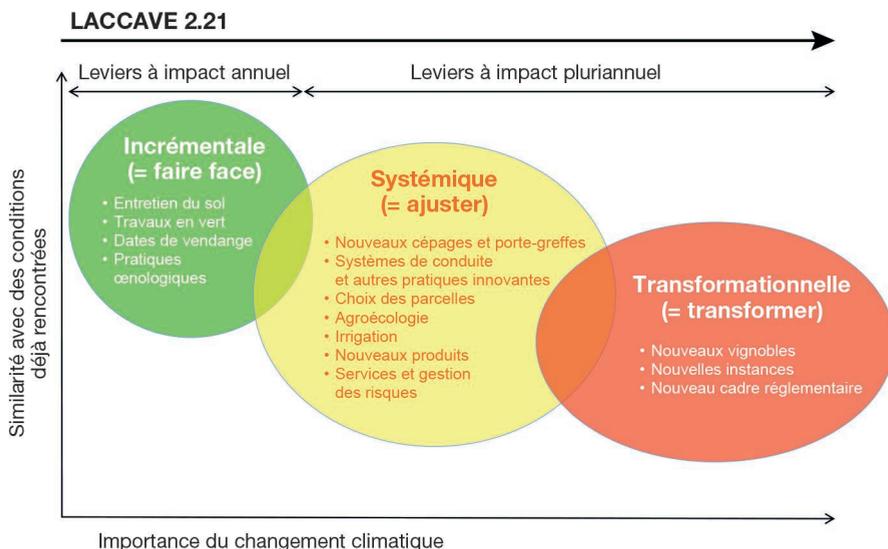


Figure Intro-4. Représentation schématique des processus d'adaptation en fonction des expériences passées des conditions climatiques et de l'intensité du changement climatique. Adapté au système viticole d'après Thornton, 2014.

Cette vision de l'adaptation a constitué le cadre analytique du projet Laccave et le socle de l'étude prospective « La filière Vigne et vin face au changement climatique à l'horizon 2050 », qui fait l'objet du chapitre II-7 de cet ouvrage. De ce fait, même si elle est capitale, la question de l'atténuation n'a pas été étudiée dans ce projet et sera peu abordée dans cet ouvrage. En conclusion, elle fera figure de perspective susceptible de devenir une condition même pour l'adaptation.

Les productions majeures du projet Laccave

La diversité des approches mises en œuvre dans le cadre du projet Laccave a permis de produire des résultats primordiaux qui sont résumés ci-après et seront développés dans la suite de l'ouvrage.

L'élaboration d'une expertise partagée

Tout au long du projet Laccave, un travail important de synthèse des principaux impacts du changement climatique et des leviers d'adaptation a été conduit, avec des publications majeures à la fois à destination du monde académique et du monde professionnel (Ollat et Touzard, 2014; Quénoel, 2014; Ollat *et al.*, 2017; Ollat et Touzard, 2018; Van Leeuwen *et al.*, 2019; Naulleau *et al.*, 2020). Ces travaux peuvent approfondir un domaine particulier d'impact ou d'adaptation, mais ils s'inscrivent généralement dans une réflexion pluridisciplinaire qui permet de les contextualiser et de mieux situer leurs apports. Des contributions pluridisciplinaires ont ainsi été menées sur des thématiques essentielles pour l'adaptation au changement climatique, comme la gestion de l'eau, les interactions biotiques, les sols, la définition d'idéotypes variétaux, l'approche territoriale en viticulture, la gestion des données, la coordination des chaînes de valeur ou l'exploration des vins du futur. Ces domaines d'action pour l'adaptation mettent à chaque fois en jeu des interactions entre des écosystèmes, des leviers techniques, des relations et organisations socioéconomiques et des connaissances. Ces domaines sont des composantes intermédiaires pour des stratégies plus globales d'adaptation, reprises par exemple en partie dans la stratégie nationale de la filière. Des séminaires participatifs ont été organisés sur ces thèmes, avec des présentations accessibles sur le site du projet³ et des synthèses qui alimentent la première partie de cet ouvrage.

L'anticipation : modélisation et prospective

La modélisation est au cœur des sciences de l'anticipation et de l'adaptation. Laccave a contribué à développer ces approches et à mettre à disposition des indicateurs agro- ou écoclimatiques simulés pour les conditions climatiques futures, et à évaluer de manière spatialisée, d'une part, les risques climatiques potentiels, et d'autre part, les opportunités pour les vignobles français. Au-delà de la production d'informations purement climatiques, l'intérêt est aussi de les coupler à des modèles de fonctionnement de la vigne tels que des modèles de phénologie ou, à plus long terme, des modèles de fonctionnement de la culture (García de Cortázar-Atauri, 2006; Quénoel *et al.*, 2017; García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2017; Sgubin *et al.*, 2018 et 2022; de Rességuier *et al.*, 2020).

3. <https://www6.inrae.fr/Laccave>.

Des modèles ont été utilisés à l'échelle du vignoble pour coconstruire avec les viticulteurs des systèmes de culture résilients vis-à-vis du changement climatique dans le contexte languedocien. Les systèmes envisagés sont testés *in silico* à partir de simulations climatiques, avec la possibilité de traiter les problèmes de gestion de l'eau et les risques thermiques (Naulleau *et al.*, 2022). Ces approches et usages de la modélisation pour l'adaptation des vignobles sont décrits dans les chapitres 1 et 9 de la première partie et dans le chapitre 6 de la seconde partie de l'ouvrage.

La prospective s'inscrit également dans les sciences de l'anticipation. L'une des productions majeures du projet Laccave a été la réalisation d'un exercice de prospective, conduit de 2014 à 2019 par un collectif de scientifiques en partenariat avec FranceAgriMer et l'Inao, et la participation active de Montpellier SupAgro. À la fois outil de construction de la pluridisciplinarité scientifique au sein du projet et de mobilisation des acteurs de la filière dans les principales régions viticoles, cette prospective a permis l'élaboration par les organisations professionnelles nationales d'une stratégie d'adaptation, présentée au ministre de l'Agriculture en 2021. Cette démarche de prospective est présentée dans sa totalité dans le dernier chapitre de cet ouvrage.

Les approches participatives

Laccave s'est fortement investi dans des approches participatives pour mobiliser et accompagner les acteurs de la filière Vigne et vin dans l'élaboration de solutions et stratégies d'adaptation à différentes échelles. Au-delà de leurs contributions à plusieurs enquêtes rapportées dans le chapitre II-1, ces acteurs ont été régulièrement invités à participer aux séminaires du projet pour rendre compte de leurs attentes, des actions qu'ils conduisaient et de leur vision de l'adaptation (Ollat et Touzard, 2014). Dans le cadre de l'étude prospective mentionnée ci-dessus (et chapitre II-7), des forums participatifs, rassemblant au total plus de 500 personnes, ont été organisés dans sept régions pour préciser les scénarios d'adaptation de leurs vignobles et proposer des solutions. Les données recueillies ont ensuite servi aux responsables professionnels, accompagnés par l'équipe prospective de Laccave, pour élaborer la stratégie nationale (Ollat *et al.*, 2020). La participation des acteurs, associée à la modélisation, est aussi au cœur de la coconstruction de systèmes de conduite résilients vis-à-vis du changement climatique alliant modélisation et approche participative qui sera présentée au chapitre II-6. D'autres approches participatives originales, à l'image des « climathons viticoles », ont été expérimentées en mobilisant à une échelle communale une diversité d'acteurs pour faire émerger des solutions permettant l'adaptation d'un vignoble (chapitre II-5). Par ailleurs, un travail d'identification d'initiatives et d'innovations en cours ou potentielles a été conduit pour les faire connaître à une échelle plus large, et leur apporter, si besoin, les connaissances produites ou mises en commun au sein du réseau Laccave. La plateforme Vineas qui rassemble ces informations illustre une autre forme de démarche participative, dans le monde virtuel (encadré II-5-5).

La formation au cœur du projet Laccave

Enfin, Laccave s'est particulièrement impliqué dans les activités de formation. Dix doctorants ont réalisé leurs recherches dans le cadre du projet ou en y étant associés étroitement. Trois thèses ont concerné la génétique et la physiologie de l'adaptation (Coupel-Ledru, 2015 ; Rossdeutsch, 2015 ; Duchêne, 2016), cinq ont abordé l'adaptation

à l'échelle locale de manière pluridisciplinaire en intégrant souvent des approches de modélisation (Neethling, 2016; Delay, 2015; Le Roux, 2017; Naulleau, 2021; Zito, 2021), et deux ont porté sur des questions économiques (Boyer, 2016; Fuentes-Espinoza, 2016). Au moins une vingtaine d'étudiants de Master issus de différentes formations ont également collaboré au projet et contribué à sa réussite. Ils doivent être fortement remerciés pour cela et ils sont, de fait, souvent associés à l'écriture des différents chapitres ou encadrés de l'ouvrage. Les connaissances produites dans Laccave ont aussi été intégrées directement et rapidement dans des modules de formation dédiés à la vigne et au vin. Plusieurs de ces modules ont été créés intégralement par des enseignants associés au projet, contribuant à la prise en compte de l'enjeu climatique dans l'enseignement universitaire et des écoles d'ingénieur. D'autres formations, plus techniques et à destination des acteurs de la filière, ont aussi profité des travaux conduits dans Laccave, par exemple à l'initiative de l'Institut français de la vigne et du vin (IFV) ou des chambres d'Agriculture (encadré II-4-2). Des exemples de ces formations sont décrits dans le chapitre II-4.

Conclusion

Ainsi, pendant une dizaine d'années, le projet Laccave a permis de construire et d'animer un réseau de chercheurs qui s'est mobilisé collectivement pour produire des connaissances et des outils sur l'adaptation de la filière Vigne et vin française au changement climatique et pour accompagner les acteurs de cette filière dans leurs réflexions stratégiques. Mieux connaître les impacts, explorer les leviers d'adaptation et coconstruire des stratégies à différentes échelles ont constitué un front de recherche complexe, à fort enjeux scientifiques et politiques, et particulièrement stimulant. Cette communauté scientifique a su relever ce défi en pratiquant une pluridisciplinarité tournée vers l'action et la médiatisation de ses productions dans la société. Elle a au moins autant appris de ses interactions avec les acteurs de la filière qu'à travers le développement de méthodes scientifiques plus classiques combinant observation, enquêtes, modélisation et analyse. Il reste encore beaucoup à faire, mais le projet Laccave avait pour objectif premier de construire des connaissances pour favoriser les actions d'adaptation au sein d'une filière. Modestement, nous pouvons affirmer qu'il y a réussi. Les seize chapitres de ce livre viennent en rendre compte.

PARTIE 1

De l'évaluation des impacts à l'étude des leviers d'adaptation

DES INDICATEURS ET DES MODÈLES POUR ÉTUDIER LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA VIGNE

Iñaki García de Cortázar-Atauri, Marie Launay et Renan Le Roux

Introduction

Dès la fin des années 1990 et les premières études d'impact du changement climatique sur l'agriculture, des outils qui avaient été jusqu'alors utilisés pour l'analyse et la compréhension des agrosystèmes ont été mobilisés. Outre l'expérimentation, dont nous ne ferons pas l'analyse dans ce chapitre, deux outils ont émergé de manière importante : les indicateurs climatiques et les modèles.

« La viticulture a été probablement l'un des premiers systèmes agricoles étudiés dans le but de caractériser les impacts du changement climatique sur cette production et cela à travers les différents vignobles du monde. » Depuis les premiers travaux de modélisation de Bindi *et al.* (2000a et b), plusieurs équipes de recherche françaises et internationales se sont intéressées à cette question. Plusieurs milliers de travaux de recherche ont été réalisés à ce jour permettant de caractériser les impacts⁴ à différentes échelles, allant du processus biologique (c.-à-d. le développement) jusqu'à la distribution spatiale du vignoble (du local au global).

Caractériser l'adéquation du climat d'une zone donnée avec le type de viticulture à développer est devenu essentiel pour les producteurs, les gestionnaires, les sélectionneurs et les décideurs d'un territoire. Les informations issues de ces travaux d'impact leur permettent alors de construire et déployer des stratégies d'adaptation pour améliorer, maintenir ou développer la viticulture de chaque région dans un contexte climatique changeant (Caubel *et al.*, 2015).

Dans ce chapitre, nous présentons un bilan historique des principaux travaux réalisés avec les principaux outils mobilisés ces dernières années pour caractériser les impacts du changement climatique dans les vignobles. Nous détaillons certains exemples et proposons quelques conseils d'utilisation de ces outils. Enfin, nous introduisons quelques perspectives quant à leur utilisation dans les années à venir.

4. Plus de 3360 articles sont référencés dans Google Scholar en mai 2023.

Cadre historique du développement des modèles et indicateurs appliqués à l'étude de l'effet du climat

La section qui suit fait l'état de connaissances concernant les deux principales méthodes qui ont été mobilisées pour étudier l'effet du climat sur la viticulture : les indicateurs et les modèles.

Les indicateurs climatiques

Les indicateurs climatiques sont dérivés des variables climatiques (température, pluie, vent...) qui fournissent des informations synthétiques (p. ex. le nombre de jours de gel) sur le climat dans un lieu donné. Les indicateurs ont été très rapidement appliqués à la viticulture pour caractériser différentes régions viticoles (comme dans Winkler [1962], où des sommes de températures moyennes supérieures à 10°C entre avril et octobre sont utilisées pour classer des régions climatiques de Californie) ou la distribution de cépages (comme dans Huglin [1978], où est développé l'index héliothermique prenant en compte les températures moyenne et maximale et la latitude pour classer les régions viticoles auxquelles sont associés certains cépages). Au début des années 2000, Tonietto et Carbonneau (2004) utilisent plusieurs indicateurs (l'index héliothermique d'Huglin, l'index de nuits fraîches et l'index de sécheresse de Riou [1994]) pour proposer une première classification climatique multicritère des vignobles à l'échelle mondiale. Ce travail fut probablement l'un des derniers à considérer le climat des vignobles comme stationnaire.

Suite à la canicule de 2003, Seguin et García de Cortázar-Atauri (2005) montrent les changements observés dans la viticulture en France et explorent à l'aide de l'indice héliothermique d'Huglin en quoi les conditions thermiques pourraient changer d'ici la fin du siècle. À la même période, Jones *et al.* (2005) proposent une classification des cépages à partir de la température moyenne de la période de croissance de la vigne (avril-octobre dans l'hémisphère nord et octobre-avril dans l'hémisphère sud), au sein des zones dans lesquelles chaque cépage est historiquement présent. Ce travail montre pour la première fois que les cépages peuvent avoir une certaine plasticité, mais qui reste encore à quantifier plus précisément. En 2006, White *et al.* publient la première étude d'impact sur le vignoble des États-Unis. Leurs résultats basés exclusivement sur des indicateurs de température prédisent une diminution allant jusqu'à 81 % de la surface du vignoble.

Ce n'est qu'au début des années 2010 que les premiers travaux d'impact passés et futurs fondés sur des indicateurs voient le jour à l'échelle européenne. C'est le cas des travaux de Santos *et al.* (2012) et Moriondo *et al.* (2013), qui mettent en lumière les changements déjà observés dans les vignobles européens et y associent les premières projections à différents horizons temporels. Leurs résultats décrivent des changements passés significatifs des régions de production. Ils projettent des conditions climatiques plus favorables dans les vignobles septentrionaux (Champagne et Alsace en France) et des conditions de plus en plus difficiles dans les régions méridionales (dues notamment aux hautes températures et sécheresses). Néanmoins, l'intensité de ces changements dépendra fortement du scénario d'émission de gaz à effet de serre. Enfin, Hannah *et al.* (2013) utilisent un ensemble d'indicateurs mensuels pour définir la viabilité de la viticulture mondiale en 2050 et décrivent une diminution de sa faisabilité, qui varie de 25 à

73% en fonction des régions. Van Leeuwen *et al.* (2013) montrent cependant les limites de ces indicateurs, étant donné leur difficulté à intégrer les potentielles adaptations qui pourraient limiter les impacts du changement climatique sur la viticulture.

En 2019, Santillan *et al.* réalisent une importante synthèse des différentes études d'impact sur les vignobles du monde et proposent une analyse des impacts à partir d'indicateurs agroclimatiques, afin d'évaluer les besoins d'adaptation de chaque région viticole. Enfin, plus récemment, l'industrie vitivinicole australienne a produit un atlas exhaustif et très complet des impacts du changement climatique sur tous ses vignobles, en décrivant des indicateurs qui tiennent compte de l'évolution des températures et de la pluviométrie (Remenyi *et al.*, 2019)⁵.

Néanmoins, toutes ces études s'appuient sur des approches empiriques qui n'ont pas permis d'intégrer finement les processus sous-jacents des impacts du changement climatique sur le fonctionnement de la plante (par ex. l'effet de la température sur la phénologie, sur la croissance et sur le fonctionnement hydrique de la plante...). Ces indicateurs montrent ainsi des limites lorsqu'il s'agit d'en tirer des informations mobilisables pour construire des stratégies d'adaptation.

Les modèles décrivant le fonctionnement de la vigne

Les modèles mathématiques peuvent être divisés principalement en deux catégories : d'une part, les modèles statistiques qui ne tiennent pas compte des processus internes du système ; d'autre part, les modèles « mécanistes », qui décrivent et quantifient chaque processus à l'intérieur du système (García de Cortázar-Atauri, 2006). Plusieurs types de modèles ont été développés pour étudier les processus liés à l'agriculture : des modèles qui s'intéressent en particulier aux processus ; des modèles qui décrivent la mise en place des organes de la plante et leur architecture et fonctionnement ; des modèles qui permettent de prédire des variables d'intérêt (rendement, qualité) à partir des relations (plus ou moins complexes) avec des variables explicatives (p. ex. l'état hydrique ou le climat) ; des modèles de culture qui tiennent compte des interactions entre différents compartiments du système (plante × sol × climat × itinéraire technique) ; des modèles qui intègrent le paysage et les facteurs biotiques comme les maladies ; et enfin, des modèles qui décrivent les décisions des agriculteurs (modèles multi-agents). Ces modèles offrent un cadre conceptuel pour étudier et explorer *in silico* le comportement des différents systèmes. Sans entrer dans une description exhaustive, plusieurs travaux ont été réalisés avec différents types de modèles, afin de caractériser les impacts du changement climatique sur la vigne à différentes échelles.

Les premiers travaux de modélisation avec un modèle de culture ont été réalisés par Bindi *et al.* (2000a et b), en Europe et plus particulièrement en Toscane (Italie). En 2006, García de Cortázar-Atauri adapte le modèle de culture Stics⁶ (Brisson *et al.*, 2009) à la vigne et réalise la première étude d'impact à l'échelle des différents vignobles français, à l'horizon 2070-2100. Dans le cadre de ce travail, plusieurs stratégies d'adaptation sont explorées. Presque en même temps, un travail semblable est réalisé par Webb (2007) sur les vignobles australiens en utilisant le modèle Vinelogic.

5. <https://www.wineaustralia.com/growing-making/environment-and-climate/climate-atlas>.

6. <https://www6.paca.inrae.fr/stics>.

En 2010 sont présentés les résultats du projet ANR Climator (Brisson et Levrault, 2010) traitant des impacts du changement climatique sur l'agriculture (dont la viticulture) en France. Ce travail précurseur compare les résultats de plusieurs modèles pour chaque système et décrit les principaux impacts en France : avancée de la phénologie, augmentation de la contrainte hydrique, disparités de production entre les vignobles du Sud (diminution) et du Nord (augmentation). Par la suite, d'autres travaux seront réalisés avec ces mêmes modèles de culture pour explorer les impacts à différentes échelles ou pour explorer différentes questions comme l'évolution des besoins en eau pour l'irrigation de la vigne (Fraga *et al.*, 2018). Parallèlement à ces études, une analyse des modèles de culture adaptés à la vigne (Moriondo *et al.*, 2015) a démarré dans le cas des initiatives d'intercomparaison de modèles (AGMIP⁷ et FACCE JPI MACSUR⁸). Ce travail a notamment permis d'identifier les potentialités mais aussi les limites de ces outils pour caractériser certains impacts et de proposer de pistes de recherche pour les améliorer : meilleure prise en compte des températures élevées dans certains processus, comme la mise en place du rendement ou la qualité ; prise en compte des événements extrêmes ; prise en compte de l'effet de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur le fonctionnement de la plante.

D'autres études ont été réalisées au cours de ces 20 dernières années, mais en se concentrant davantage sur la modélisation des processus. Cela a été notamment le cas pour la phénologie et le bilan hydrique. Duchêne et Schneider (2005) avaient proposé dès 2005 un premier bilan de l'évolution des conditions climatiques et de ses conséquences sur la phénologie et la qualité (représentée par la teneur potentielle en alcool des vins). En 2017, García de Cortázar-Atauri *et al.* réalisent une première synthèse des effets du changement climatique sur la phénologie de la vigne en France. Ce travail fait le bilan des changements déjà observés pour les différents stades phénologiques (débourrement, floraison et véraison), mais aussi concernant la date de vendange. Cette étude, qui a été réalisée dans le cadre du projet Laccave, présente en outre des projections de l'évolution de la phénologie dans tous les vignobles de France, en prenant en compte différents cépages (Chardonnay, Syrah et Cabernet-Sauvignon) et différents horizons (2000, 2050, 2100), sous différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP⁹ 2.6, 4.5 et 8.5).

L'autre principal processus, historiquement étudié dans ce contexte, est le bilan hydrique. Schultz et Lebon (2005) publient l'un des premiers travaux sur la question. Ils explorent l'évolution possible du bilan hydrique en fonction de différents scénarios de demande évaporative et montrent que la vigne pourrait avoir une capacité d'adaptation importante face au contexte climatique futur. Par la suite, Pieri et Lebon (2010) simulent l'évolution future du confort hydrique dans le cadre du projet ANR Climator¹⁰ (Brisson et Levrault, 2010) et confirment que, selon les scénarios utilisés à l'époque, celui-ci ne devrait pas suivre une détérioration générale. Néanmoins, Lebon et García de Cortázar-Atauri (2014) montrent une potentielle augmentation des

7. Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, <https://agmip.org>.

8. Food security, agriculture, climate change – Joint programming initiative – Modelling European agriculture with climate change for food security, <https://stics.paca.hub.inrae.fr/partenaires-et-projets2/projets-en-cours/macsur>.

9. RCP : *Representative Concentration Pathway*, en anglais. Chaque RCP représente une trajectoire représentative de concentration des gaz à effet de serre jusqu'à l'horizon 2100. Ces scénarios ont été établis par le Giec dans son cinquième rapport.

10. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/centre-ressources/livre-vert-du-projet-climator>.

déficits hydriques sévères et alertent sur le fait que d'autres travaux de modélisation et des expérimentations seraient nécessaires pour évaluer les stratégies d'adaptation face à une ressource en eau limitée. Par la suite, l'évolution future du bilan hydrique a systématiquement fait l'objet d'études menées avec des modèles de culture (comme Fraga *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022).

Les travaux de modélisation du fonctionnement de la vigne ont été fortement influencés ces dernières années par les questions émergentes liées à l'identification des meilleures stratégies d'adaptation de la viticulture au changement climatique. Une synthèse générale de ces questions est proposée à la fin de ce chapitre.

Travaux récents sur le développement d'indicateurs climatiques en viticulture

Comme nous venons de le décrire, les indicateurs climatiques ont eu un rôle prépondérant dans les travaux de recherche sur les impacts du changement climatique en viticulture. Néanmoins, ces travaux mobilisent des indicateurs dits agroclimatiques : des indicateurs calculés sur des périodes définies par des dates calendaires (p. ex. 1^{er} avril et 31 octobre; fig. I-1-1). Ces indicateurs (le nombre de jours de gel et/ou la quantité de précipitations sur des périodes spécifiques) permettent notamment d'évaluer et de comparer les effets du climat dans plusieurs territoires. Toutefois, ces indicateurs s'appuient sur l'hypothèse que la période de fonctionnement de la plante (ici la vigne) ne changera pas au cours du temps, car le climat serait stationnaire. Mais la phénologie de la vigne ayant déjà été modifiée, elle continuera de changer (avancer ou retarder) dans les années à venir.

Ainsi, pour prendre en compte cette évolution du cycle de développement de la vigne, mais aussi de sa variabilité intraspécifique (le niveau de précocité de cépages), un nouveau type d'indicateur a été proposé : les indicateurs dits écoclimatiques (Caubel *et al.*, 2015). Ces indicateurs définissent la période de calcul en utilisant les stades phénologiques

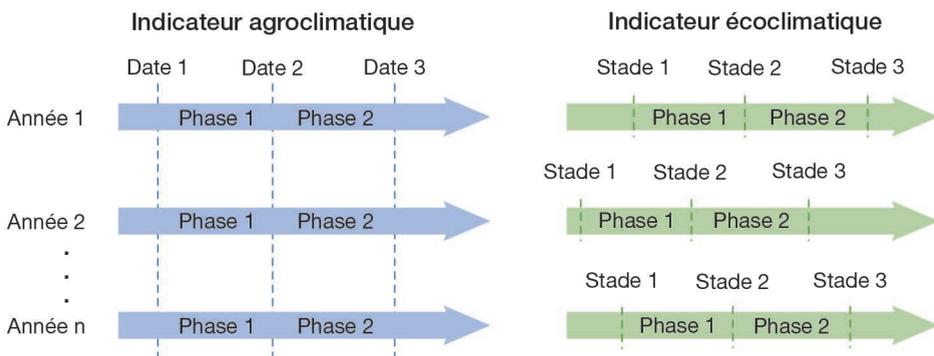


Figure I-1-1. Schéma conceptuel d'un indicateur agroclimatique (à gauche) et d'un indicateur écoclimatique (à droite). Les indicateurs agroclimatiques décrivent une phase en utilisant deux dates calendaires (p. ex. 1^{er} janvier et 31 janvier), alors que les indicateurs écoclimatiques utilisent des stades phénologiques.

(observés ou simulés à partir d'un modèle) de l'espèce ou de la variété d'intérêt. De la sorte, le positionnement des phases mais aussi la durée entre deux stades varie d'une saison végétative à l'autre. Cette méthode permet d'obtenir des informations sur les effets du climat directement en lien avec la croissance et le développement des cultures, en positionnant ces effets sur les phases sensibles du cycle de la plante. Par ailleurs, il est aussi possible d'intégrer des seuils critiques dans ces indicateurs qui représentent le fonctionnement écophysologique de chaque espèce. Ces seuils vont permettre de tenir compte des réponses de la plante à son environnement et donc de considérer les impacts de manière plus précise (p. ex. la définition d'un seuil de 37°C comme température critique de développement).

Plusieurs études ont été réalisées ces dernières années en développant cette méthode. Ainsi, García de Cortázar-Atauri et al. (2016) proposent un cadre conceptuel pour caractériser l'évolution des conditions climatiques des différents vignobles français, en prenant en compte la phénologie de la vigne (fig. I-1-2).

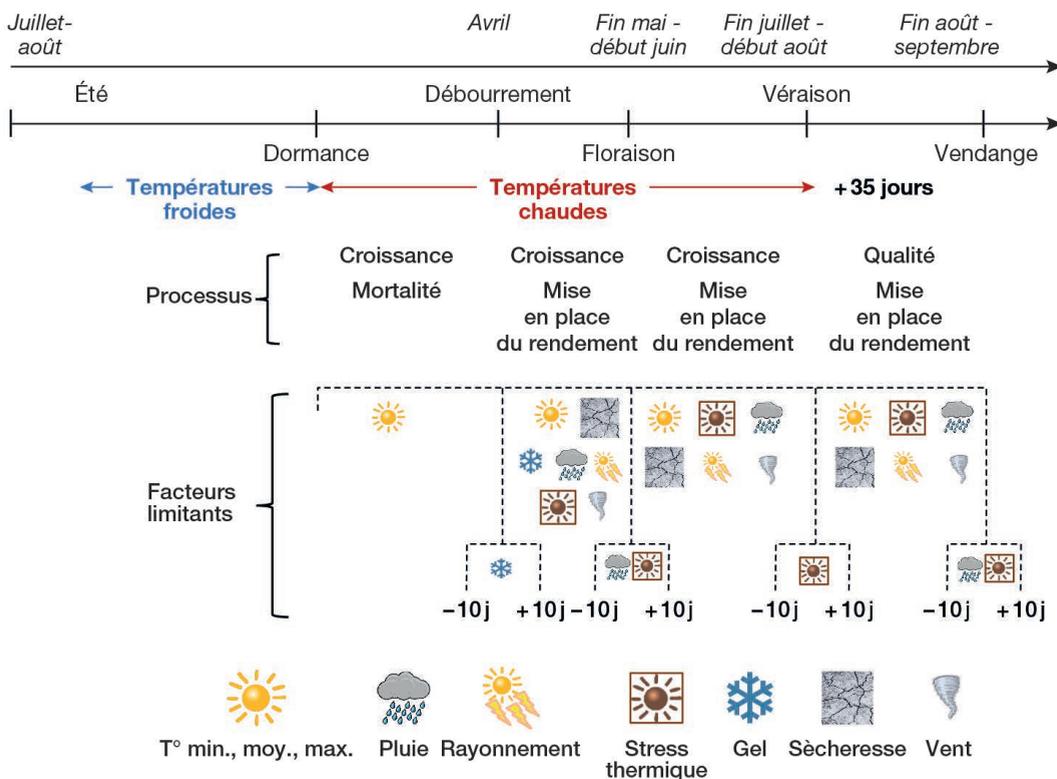


Figure I-1-2. Schéma de calcul des indicateurs écoclimatiques pour la vigne. D'après Marjou et García de Cortázar-Atauri, 2019.

Plusieurs facteurs limitants sont considérés : les valeurs des températures minimales, moyennes et maximales; les cumuls de pluie; le cumul de rayonnement; les températures maximales supérieures à 30°C; le gel; le déficit hydrique; les jours avec un vent supérieur à 15 km/h. La liste complète d'indicateurs calculés dans Marjou et García de Cortázar-Atauri (2019) se trouve dans l'annexe 1 du document. Les valeurs « + 10 j » ou « - 10 j » signifient que le calcul de l'indicateur a été réalisé dans la période concernant les 10 jours avant et après le stade phénologique.

Cette approche écoclimatique permet de décrire l'évolution des conditions climatiques futures dans chaque vignoble de France. Les principaux impacts simulés varient de manière importante en fonction de l'horizon temporel (2050 ou 2100) mais surtout du scénario d'émissions retenu (RCP) :

- une avancée généralisée de la phénologie, avec différents niveaux d'intensité entre les vignobles du Sud et ceux du Nord;
- une augmentation significative et généralisée des températures, en particulier durant la période de maturité;
- des situations contrastées au regard de la contrainte hydrique, mais avec une importante dégradation dans les vignobles méditerranéens.

Des travaux plus récents ont permis de regarder ces impacts plus en détail dans différents vignobles (Marjou et García de Cortázar-Atauri [2019], dans le vignoble de l'AOP Ventoux; Zito [2021], dans le vignoble de Bourgogne) et parfois à une résolution spatiale plus fine (Huard, 2021).

Les travaux de ces dernières années sur l'évolution du risque de gel (Sgubin *et al.*, 2018 et 2019; Leolini *et al.*, 2018) ont adopté l'approche écoclimatique, en tenant compte de l'évolution de la date de débourrement avec le changement climatique. Ils ont mis en exergue la qualité des modèles de phénologie utilisés pour calculer la date de débourrement, car la probabilité (ou pas) d'observer un risque de gel est très fortement liée à la date de débourrement simulée par les modèles (Sgubin *et al.*, 2018). Ainsi, il paraît très difficile d'écarter un tel risque (contrairement à ce qui avait été décrit dans le projet Climator par exemple) et cela a été démontré en 2021 et 2022, avec des épisodes de gel exceptionnels attribués au changement climatique (Vautard *et al.*, 2023).

Les indicateurs écoclimatiques ont aussi permis de comprendre certaines évolutions observées ces dernières années (Bécart *et al.*, 2022; Meggio, 2022), et de nous fournir de la sorte des informations sur les risques potentiels et la manière de s'y adapter. Ainsi, Bécart *et al.* (2022) utilisent le logiciel Getari¹¹ (García de Cortázar-Atauri et Maury, 2019) pour déterminer les facteurs climatiques ayant pu affecter l'évolution de la qualité du raisin dans la vallée du Rhône de 1969 à 2020. Ce travail a confirmé le poids majeur des différentes variables climatiques à différentes périodes du cycle de la vigne sur l'augmentation de la teneur en sucres et la diminution de l'acidité. De plus, il a démontré comment les conditions climatiques à certaines périodes affectent le fonctionnement de la plante et le rendement potentiel : le poids de 200 baies est ainsi très fortement corrélé à la température pendant la phase de la nouaison et de la fin du grossissement de la baie.

Enfin, la capacité d'adaptation de la vigne a été évaluée en prenant en compte l'évolution de sa phénologie et, par conséquent, de sa faisabilité climatique (conditions climatiques pour assurer une production et un certain niveau de qualité). En 2010, Duchêne *et al.* publient une étude très novatrice sur la capacité d'adaptation de plusieurs cépages en Alsace et montrent qu'il est nécessaire de créer des cépages très tardifs afin d'échapper aux fortes augmentations de température attendues durant la maturation des baies (voir encadré I-1-1; fig. I-1-3).

Morales-Castilla *et al.* (2020) ont exploré à l'échelle mondiale la capacité d'adaptation de la vigne en mobilisant sa diversité intraspécifique. Un modèle de phénologie a été

11. Generic Evaluation Tool of Agroclimatic Indicators, <https://agroclim.inrae.fr/getari>.

Encadré I-1-1. Un exemple de simulation d'impacts sur la phénologie

La phénologie d'une culture décrit le calendrier des transitions entre les grandes phases du développement végétatif et reproducteur. Pendant ces phases, les conditions de sol et de climat, telles que la disponibilité en eau et en éléments minéraux, le rayonnement solaire, l'humidité de l'air, vont avoir des impacts forts sur la mise en place du couvert végétal, sur le développement des fleurs et des baies, sur leur nombre, leur volume mais aussi sur la composition des raisins et donc des vins. Le passage entre les principaux stades — levée de dormance, débourrement, floraison, véraison — est très largement dépendant des conditions de température, et de nombreux modèles permettent de les prévoir en disposant uniquement de températures journalières de l'air. Le principe général, qui s'applique à bien d'autres plantes mais aussi à d'autres organismes vivants, est de calculer des « sommes de températures actives » : on cumule de jour en jour la différence entre la température moyenne et une température de base qui est considérée comme le seuil critique de fonctionnement de l'espèce.

Ces modèles, plus ou moins complexes, permettent de prédire les différents stades. Ainsi, à partir de ces outils et de données climatiques observées ou issues de modèles simulant les conditions climatiques futures, il est aujourd'hui possible, par exemple, d'avoir un ordre de grandeur des températures pendant la maturation des raisins dans un climat du futur, comme illustré dans la figure ci-dessous.

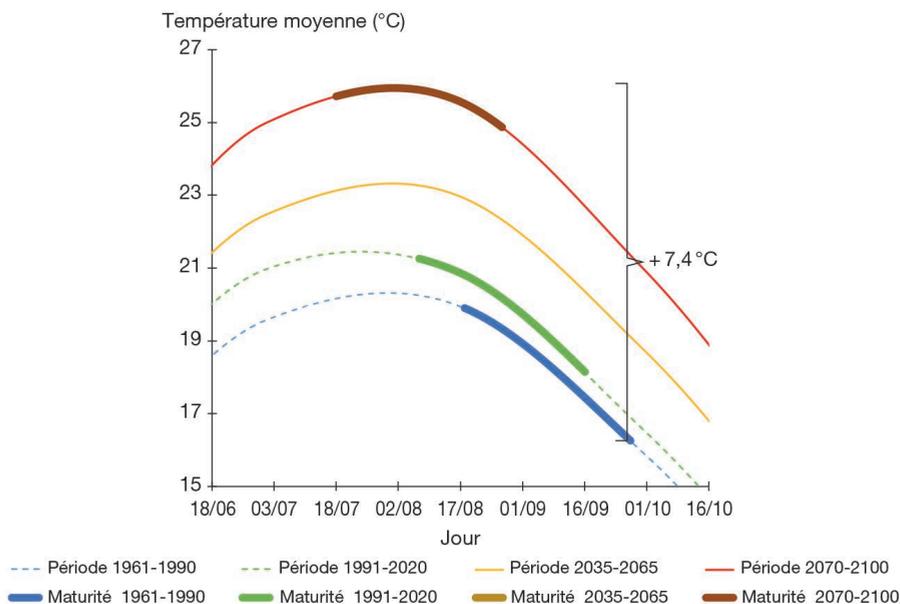


Figure I-1-3. Évolution des températures moyennes en été sur 650 mailles de 8 × 8 km du territoire français, où la vigne représente plus de 5% des surfaces.

Les données jusqu'en 2020 sont extraites des données Météo-France Safran. Au-delà, elles correspondent à des simulations avec le modèle CNRM-CM5/ALADIN63 et le scénario Giec RCP 8.5. Les dates de véraison du Chardonnay ont été simulées et la période de maturation représentée correspond aux 40 jours qui suivent. Ce graphique montre, d'une part, que la période de maturation se décale vers le milieu de l'été et, d'autre part, qu'à une date donnée les températures sont de plus en plus chaudes. Il en résulte une augmentation possible de 7,4°C des températures pendant la maturation d'ici la fin du siècle.

adapté à une dizaine de cépages et un groupe d'indicateurs a été défini pendant la maturité pour décrire les meilleures conditions de faisabilité climatique de la vigne (voir la description complète dans les informations supplémentaires de l'article). Leurs résultats montrent, d'une part, que le changement climatique pourrait réduire de manière très significative la faisabilité de la viticulture à l'échelle mondiale (la surface mondiale diminuerait de 56% avec une augmentation de 2°C et de 85% avec une augmentation de 4°C)¹², mais d'autre part que la diversité intraspécifique (représentée dans l'article par les différents niveaux de précocité des cépages) pourrait permettre de réduire ces impacts de manière importante (de 24 à 56% à 2°C, et de 58 à 85% à 4°C). Enfin, début 2023, Sgubin *et al.* ont proposé d'adapter partiellement la méthode utilisée par Santos *et al.* (2012), en prenant en compte la phénologie afin d'explorer les potentiels impacts du changement climatique en Europe sur la faisabilité de la viticulture. Ils ont confirmé les tendances de diminution des zones viticoles actuelles et d'apparition de nouvelles zones dans les régions septentrionales, ainsi que la stratégie d'utilisation de la variabilité intraspécifique comme stratégie d'adaptation. Mais ils ont aussi montré que ces stratégies pourraient perdre de leur efficacité, surtout si les températures dépassent un seuil de 2°C de réchauffement.

En parallèle de tous ces travaux de recherche, des initiatives ont émergé dans les différents secteurs de production. Le milieu professionnel et technique s'est mobilisé pour fournir aux producteurs et conseillers des informations afin de mieux appréhender les impacts du changement climatique dans les différents vignobles et d'engager des réflexions sur les stratégies d'adaptation (de la parcelle au territoire). Nous pourrions citer ici les programmes Oracle¹³ et ClimA-XXI¹⁴ (chapitre II-4; encadré II-4-2), déployés au niveau départemental par les chambres d'Agriculture; le projet Climenvi¹⁵ de la chambre d'Agriculture de la Région Centre - Val de Loire (encadré II-5-4); les travaux sur le vignoble de l'AOP Ventoux (Marjou et García de Cortázar-Atauri, 2019; Huard, 2021; encadré II-5-3); la plateforme Canari-France¹⁶ développée par Solagro et Météo-France pour produire des indicateurs d'impact à l'échelle de la France. Enfin, le réseau mixte technologique (RMT) ClimA¹⁷ a permis de regrouper l'ensemble des acteurs de la recherche appliquée et finalisée, du développement agricole et rural, mais aussi de l'enseignement agricole, pour travailler en commun sur l'adaptation des exploitations au changement climatique. Toutes ces démarches mobilisent les institutions et les acteurs de la filière et des territoires, développent et partagent des constats et des stratégies établis sur des approches mobilisant des indicateurs agroclimatiques et écoclimatiques.

12. Les seuils de 2 et 4°C d'augmentation sont souvent utilisés dans la littérature pour représenter des évolutions du climat sans forcément définir un horizon temporel. Néanmoins, d'une manière générale, on assume que 2°C correspond au réchauffement attendu probablement en 2050 et 4°C à un réchauffement potentiel à la fin du siècle sans modification des politiques d'émissions actuelles (en 2023).

13. Observatoire régional sur l'agriculture et le changement climatique.

14. Climat et agriculture au XXI^e siècle.

15. Climenvi : intégrer le changement climatique dans les décisions des chefs d'entreprises viticoles du Centre - Val de Loire (encadré II-5-4).

16. Climate Analysis for Agricultural Recommendations and Impacts, <https://canari-france.fr>.

17. Le réseau mixte technologique ClimA rassemble un collectif d'experts de la recherche, de la formation et du développement, pour accélérer la conduite et le transfert des travaux de R et D sur l'adaptation des exploitations agricoles au changement climatique. <https://rmt-clima.fr>.

Travaux récents sur la modélisation de la vigne appliquée aux études du climat

Les premiers travaux de modélisation présentés plus haut ont permis de caractériser des impacts plus ou moins complexes du changement climatique sur la production viticole. Mais ces travaux ont aussi mis en lumière le besoin d'acquérir de nouvelles connaissances pour mieux décrire le fonctionnement du système viticole dans son ensemble (depuis l'organe jusqu'au territoire) face à ces nouveaux enjeux. Ainsi, les travaux récents réalisés par l'initiative AGMIP confirment la nécessité de travailler sur les processus, tout comme sur la façon de les intégrer dans les modèles pour qu'ils expriment au mieux les effets des conditions, parfois extrêmes, sur la plante. Dans ce cadre, plusieurs travaux de recherche sont en cours en France, dans l'objectif de mieux décrire et représenter le fonctionnement de la vigne et de l'ensemble de son système.

Mieux décrire et comprendre le fonctionnement hydrique de la plante

La nécessité de mieux modéliser le fonctionnement et l'architecture des racines de la vigne est donc essentiel pour améliorer la représentation de la capacité d'adaptation de la plante au changement climatique et plus spécifiquement aux épisodes de sécheresse. Le système vigne a en effet une complexité importante puisque son fonctionnement (notamment hydrique) intègre l'interaction entre la partie aérienne (le cépage) et la partie racinaire (le porte-greffe). Fichtl *et al.* (2023) proposent un cadre conceptuel combinant les modèles de bilan hydrique et des descripteurs de l'architecture racinaire des porte-greffes. Ce cadre de travail devrait permettre de mieux représenter l'évolution du système face à la contrainte hydrique, notamment pendant la période d'implantation de la plante. Les auteurs suggèrent de caractériser les principaux traits architecturaux des racines via les plateformes de phénotypage et d'intégrer ces connaissances dans des modèles dits « plante-centrés ». Ces outils seront utiles pour explorer *in silico* le comportement de la plante dans des environnements très variés et contribuer à la sélection de nouveaux porte-greffes.

Par ailleurs, une meilleure représentation du fonctionnement hydraulique de la vigne devient cruciale pour étudier la contrainte hydrique et son évolution dans le contexte du changement climatique. Des travaux récents ont rendu possible la représentation de l'architecture hydraulique de la vigne pour analyser et prédire la distribution spatiale des échanges gazeux (modèle Hydroshoot; Albasha *et al.*, 2019). Ce type de modèle et d'autres travaux sur l'architecture du couvert végétal (Prieto *et al.*, 2020) devraient permettre d'explorer plus en profondeur l'évaluation du fonctionnement de la vigne et ainsi tester des hypothèses d'adaptation de la conduite du vignoble à des contraintes environnementales croissantes, telles que le déficit hydrique ou les températures très élevées.

Mieux décrire et anticiper l'évolution de la phénologie

Nous avons montré l'importance d'une modélisation de la phénologie — processus ayant un impact sur l'ensemble du fonctionnement de la plante — qui intégrerait directement les impacts climatiques dans chaque région et en fonction du cépage. Plusieurs dizaines de travaux ont été publiés ces dernières années proposant de nouveaux modèles pour simuler

certains stades phénologiques (p. ex. Parker *et al.*, 2020), ou pour tester les modèles existants dans de nouvelles conditions de culture (Wang *et al.*, 2020). Malgré la robustesse de la plupart des modèles, des améliorations sont encore nécessaires pour mieux caractériser certaines phases de développement, comme la dormance et post-dormance, ou leur réponse aux températures élevées. Ces évolutions devraient améliorer la caractérisation de certains impacts (p. ex. le risque de gel autour du débourrement), tout en réduisant les incertitudes autour du choix des cépages dans certaines régions à risque.

Prendre en compte l'évolution du risque sanitaire

Ces dernières années, plusieurs travaux de modélisation des maladies de la vigne ont exploré les impacts du changement climatique sur les interactions hôte-pathogène. Les travaux de Zito (2021) mettent en lumière la complexité des interactions entre l'hôte (ici la vigne) et le pathogène (ici l'oïdium) en fonction des régions. Il a néanmoins identifié l'intérêt des modèles mécanistes pour la représentation de certains processus complexes du fonctionnement des systèmes (p. ex. l'intensité de la maladie). Par ailleurs, Castex *et al.* (2023) ont travaillé sur l'évolution future de la pression de *Lobesia botrana* (l'eudémis ou ver de la grappe) sur la vigne et notamment comment le synchronisme entre ces deux espèces pourrait être modifié à l'avenir. Leurs résultats montrent que les régions du Sud pourraient voir le nombre de générations de *L. botrana* limité par les fortes températures, alors que des conditions de plus en plus chaudes dans les régions septentrionales pourraient favoriser l'émergence d'une nouvelle génération.

Vers une modélisation participative et la coconstruction de stratégies d'adaptation

Les modèles de culture adaptés à la vigne continuent aussi d'être en développement et testés dans différentes situations. Ces outils permettent d'appréhender des questions de plus en plus complexes, mais requièrent un certain niveau de maîtrise de l'outil, ainsi que des informations d'entrée (données décrivant le climat, le sol, la plante, les itinéraires techniques et les conditions initiales du système) qui limitent leur usage dans certains contextes. L'analyse réalisée par Moriondo *et al.* (2015) et, plus récemment, celle de Knowling *et al.* (2021) font le point des atouts et limites de ces outils. Enfin, Naulleau *et al.* (2022a et b) proposent un cadre participatif pour développer un modèle de rendement de la vigne (dans un contexte de climat méditerranéen), avec l'objectif de l'utiliser pour coconstruire des stratégies d'adaptation, en lien avec les usages de l'eau (cf. chapitres I-7, II-6). Ce type d'approche, ainsi que les travaux autour des modèles « multi-agents » qui ont été développés ces dernières années, vont permettre d'explorer des scénarios d'adaptation à des échelles allant de l'exploitation jusqu'au territoire (Tissot *et al.*, 2020).

Limites et perspectives

L'ensemble des travaux décrits dans ce chapitre, bien que leur liste ne soit pas exhaustive, ont permis de caractériser avec plus ou moins de précision les impacts passés, présents et futurs du changement climatique sur la viticulture. Parmi les outils que nous avons explorés précédemment, nous avons montré par exemple que les indicateurs agroclimatiques adaptés à la vigne avaient des limites pour prendre en compte

les conditions climatiques changeantes, et donc pour aider à la définition des stratégies d'adaptation. Mais nous avons aussi montré d'autres limites et perspectives de recherche pour les années à venir.

L'ensemble de ces travaux a mis à jour des nouvelles limites, que ce soit au niveau méthodologique ou de nos connaissances. C'est le cas particulièrement des données climatiques qui servent de variable d'entrée pour les calculs d'indicateurs et des modèles. La communauté scientifique travaillant sur le climat a par conséquent produit un très grand nombre de jeux de données issus des différents modèles, à différentes échelles spatiales et temporelles, et en prenant en compte les différents scénarios d'émission. Cette diversité des données permet de réaliser des analyses plus robustes et intègre un plus grand nombre de situations, afin de mieux décrire et prendre en considération les incertitudes au sein de la chaîne des calculs (modèle ou indicateur – modèle climatique – scénario climatique). Le récent travail de Sgubin *et al.* (2023) montre l'importance de bien tenir compte de ces incertitudes pour mieux interpréter les résultats.

Une meilleure description du sol, de ses compartiments, de son fonctionnement et de ses interactions avec la plante (notamment *via* les racines) est un enjeu majeur pour les années à venir. Le sol est en effet identifié comme une partie fondamentale du système, autant dans la définition des stratégies d'adaptation (réservoir d'eau et de nutriments pour la plante) que pour l'atténuation (stockage de carbone) ou pour la fourniture de services écosystémiques (biodiversité). D'importantes bases de données nationales ou régionales existent, qui décrivent ses composantes physiques¹⁸. Néanmoins, une meilleure prise en compte de sa diversité demeure nécessaire, notamment dans les modèles de culture (comme Stics) ou dans les plateformes de calcul (comme OpenFluid¹⁹), car elle permettrait d'explorer des questions concernant la gestion de l'irrigation (en lien avec la ressource en eau) ou la contribution de la viticulture aux stratégies de stockage de carbone. Un travail important de mise en commun des bases de données (sol, climat, pratiques culturales) sera par ailleurs nécessaire dans les années à venir, pour ouvrir la voie à la définition de stratégies d'adaptation locales. Enfin, une meilleure observation et modélisation de l'évolution des conditions physiques du sol (notamment l'évolution de la température) et des interactions entre les plantes et les microorganismes telluriques s'imposera, afin d'explorer des stratégies d'adaptation, notamment dans un cadre de transition agroécologique.

Une autre limite importante de ces outils concerne l'état des connaissances actuelles sur les seuils de réponse de la vigne. La plupart des indicateurs et certaines fonctions de réponse des modèles utilisent des valeurs seuils (p. ex. température maximale de développement; Merrill *et al.*, 2020), qui décrivent des points de réponse critiques de la plante. Ces valeurs, souvent issues de la littérature et obtenues à partir de travaux d'expérimentation très anciens, montrent leurs limites (p. ex. leur représentativité face à la variabilité intraspécifique) et nécessitent dans certains cas d'être confirmées, ou même définies plus précisément (p. ex. seuils de réponse à la contrainte hydrique). Néanmoins, la mise en place des expérimentations nécessaires pour comprendre ces processus et définir ces valeurs seuils peut être très complexe et coûteuse (Merrill *et al.*, 2020).

18. <https://www.gissol.fr>.

19. <https://www.openfluid-project.org>.

Enfin, et en lien avec le point précédent, l'accès aux données devient crucial pour bien évaluer et valider ces outils. Des bases de données d'observation ouvertes sont nécessaires pour pouvoir explorer correctement certaines questions. Des travaux importants ont été réalisés ces dernières années sur les données de phénologie (voir par exemple le portail du réseau Tempo²⁰), mais il est nécessaire d'aller au-delà. Un point essentiel pour l'avenir sera d'intégrer notamment des données d'observation des régions viticoles du bassin méditerranéen et localisées au sud de la France, qui pourraient permettre de tester ces modèles et indicateurs dans des conditions extrêmes et ainsi d'évaluer leur domaine de validité.

Les travaux d'impact, et notamment les outils développés à cet égard, doivent donc intégrer des connaissances issues de la recherche fondamentale (description de mécanismes), afin de fournir des informations robustes. Réfléchir à l'utilisation de ces outils en amont garantira leur transfert et leur déploiement dans de meilleures conditions vers des organismes en charge de la recherche appliquée et du développement (interprofessions, instituts techniques, chambres d'Agriculture). Ainsi, nous devons dès maintenant constituer des formations et des espaces de coconstruction (comme dans l'Axe 1 du réseau mixte technologique ClimA), afin d'assurer leur utilisation optimale pour le conseil et la définition des stratégies d'adaptation locales face aux enjeux du changement climatique.

20. Tempo est un réseau national d'observatoires dédiés à la phénologie de l'ensemble du règne vivant, <https://tempo.pheno.fr>.

LES SOLS VITICOLES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Stéphane Follain, Étienne Fayolle et Amélie Quiquerez

Introduction

« Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes). » (Afes, 2018.)

Au niveau mondial, la surface des terres émergées et cultivables est relativement faible, de l'ordre de 5 milliards d'hectares (FAO, 2021). En effet, près de deux tiers des terres émergées ne sont pas cultivables pour des raisons multiples : des raisons physiographiques, comme des conditions de relief inappropriées ; des raisons climatiques, comme des conditions de température extrêmes ou de disponibilité en eau qui créent des blocages à la production de biomasse ; ainsi que pour des raisons intrinsèques au sol, comme des sols trop peu épais, hydromorphes ou pauvres chimiquement. Ce constat sur l'abondance de la ressource en sol est à croiser avec l'idée qu'à l'échelle humaine la production de sol *via* les processus de pédogenèse est très lente, de l'ordre de quelques millimètres à centimètres par millénaire (Schaetzl et Thompson, 2015), ce qui est bien plus lent que les pertes liées à l'artificialisation ou à l'érosion (Montgomery, 2007 ; Nearing *et al.*, 2017). Le sol apparaît donc comme une ressource rare et non renouvelable à l'échelle humaine malgré son apparente abondance. À l'échelle mondiale, la FAO estime à environ 33% la proportion de terres arables modérément ou gravement dégradées et devenues improductives. À l'échelle de l'Europe, on estime que 13% de la surface des sols sont menacés (Borelli *et al.*, 2017, 2020), et qu'actuellement 61% des terres sont dégradées²¹. Cet état de la ressource, lié à l'essor démographique mondial et aux besoins associés, explique les tensions qui s'exercent dessus et le nombre croissant de conflits d'usage. Rappelons simplement que l'augmentation espérée sur les volumes de productions agricoles est de l'ordre de 70 à 100% (Van Dijk *et al.*, 2021 ; Alexandratos et Bruinsma, 2012).

21. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard> (consulté le 14/12/2023).

Bien que la ressource en sol soit limitée, celui-ci joue un rôle crucial en assurant des fonctions et des services écosystémiques essentiels (Haygarth et Ritz, 2009; Bünemann *et al.*, 2018). Parmi ses fonctions multiples (fig. I-2-1), rappelons que le sol sert à la production d'aliments, de fibres et de combustibles, d'habitats pour les organismes et de support culturel et patrimonial (FAO, 2015). Pour autant, il est exposé à de nombreuses pressions qui conduisent à sa dégradation quantitative et qualitative sur le temps long. Parmi les plus critiques, on peut citer l'érosion, le tassement, l'artificialisation, la perte de carbone organique, ainsi que les déséquilibres en nutriments qui peuvent compromettre ses fonctions (FAO et ITPS, 2015; Montanarella *et al.*, 2016). Ces tendances actuelles à la dégradation sont préoccupantes, d'autant plus que si rien n'est réellement entrepris elles s'accroîtront sous l'effet des changements globaux (IPCC, 2019). De nombreux scientifiques le crient depuis longtemps : protéger les sols est essentiel au maintien de nos sociétés et constitue un enjeu majeur, vital, de ces prochaines décennies (Blum, 1998; Lal, 2004).

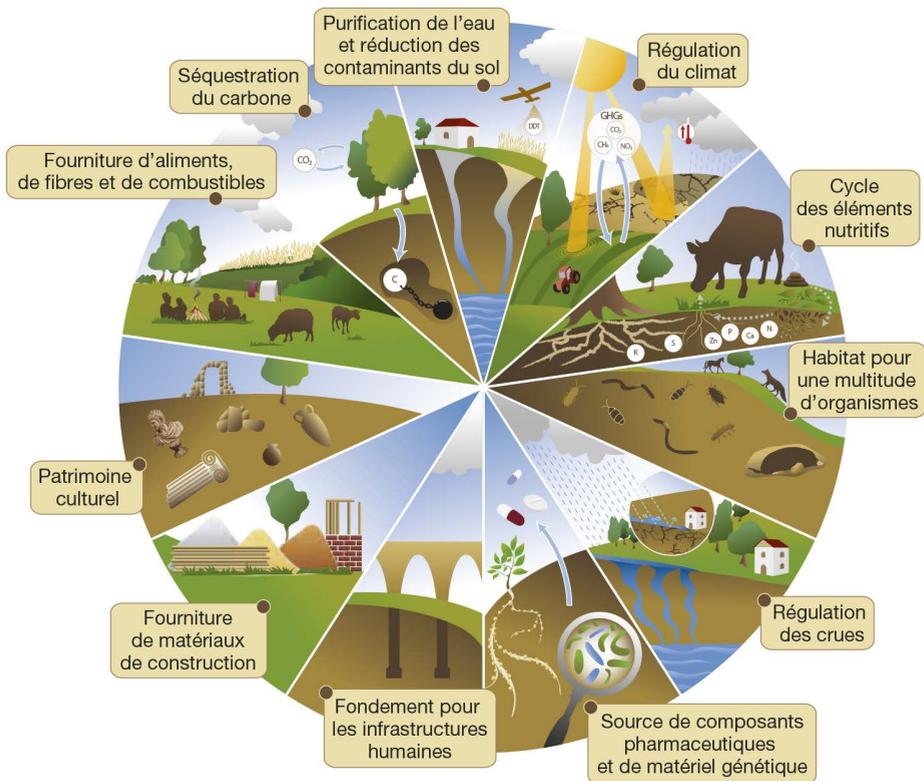


Figure I-2-1. Les fonctions du sol. Source : FAO (Nations unies), 2015.

La production vitivinicole doit relever le défi de l'adaptabilité sur deux dimensions complémentaires : celle qui réside en l'adoption et la transition vers des modes d'exploitation qui soient à la fois performants sur le plan de la production et conservatoires vis-à-vis de la ressource²², et celle qui réside en l'adaptation des systèmes de production face aux changements climatiques et socioéconomiques.

22. <https://sdgs.un.org/goals> (consulté le 14/12/2023).

Afin d'identifier les défis qui attendent les sols viticoles face aux changements climatiques, la première étape est d'analyser en quoi les sols viticoles sont spécifiques et ce que sont les fonctions particulières qu'ils supportent. Dans un second temps, il devient alors possible d'imaginer les dynamiques futures probables et de nous interroger sur la durabilité de la production viticole.

Les spécificités des sols viticoles

Les sols viticoles sont variables dans leur type, leurs propriétés. Ces variabilités sont sous forte dépendance du climat et des autres facteurs de formation des sols. Néanmoins, ils présentent des traits pédologiques communs et remplissent tous des fonctions et services essentiels.

Variabilités pédoclimatiques

Bien que le sol joue un rôle crucial dans la typicité d'un terroir, sa description est souvent sommaire et réductrice, ce qui peut donner l'impression qu'il n'existe qu'une faible variabilité dans les sols favorables pour la viticulture en France métropolitaine. En réalité, le spectre de types de sol viticole en France métropolitaine est large (Fanet, 2001). Citons pour exemple les Rankosols sur schistes à Roquebrun et Berlou (AOC Saint-Chinian), avec localement des épaisseurs très faibles et des pH parfois inférieurs à 4,0, les Peyrosols des terrasses alluviales de Châteauneuf-du-Pape et leur pierrosité supérieure à 60%, ou encore les Calcosols à potentiel chlorosant souvent élevé sur calcaires et marnes de la côte de Beaune (Côte-d'Or). Au final, on peut penser que l'on peut produire du vin sur n'importe quel type de sol. Cela est presque vrai, à condition que ce sol soit capable de remplir les fonctions requises pour la production végétale, que le matériel végétal soit adapté, mais surtout que le climat soit favorable. En effet, le climat est le premier facteur de contrôle de la distribution spatiale de la production vitivinicole (Gladstones, 1992; Jones, 2006), ce qui explique la popularité et la puissance prédictive des indices climatiques comme l'indice héliothermique ou indice de Huglin (1978), ainsi que les approches multi-indices et spatialisées telles que le système Classification climatique multicritère (Tonietto et Carbonneau, 2004). Le climat est par ailleurs l'un des facteurs principaux de la pédogenèse (Dokuchaev, 1899; Strakhov, 1967) et de la régulation du fonctionnement des sols.

C'est cette forte dépendance entre sol et climat qui explique l'importance du concept de « contexte pédoclimatique », souvent mis en avant par les pédologues. Comprendre ce contexte est crucial pour optimiser les conditions de croissance des plantes et piloter la production viticole, en prenant en compte les caractéristiques du sol et du climat dans lesquelles les vignes vont se développer. En connaissant le contexte pédoclimatique, il est possible de choisir le matériel végétal le plus adapté et les pratiques agricoles les plus appropriées pour tirer le meilleur parti de cette interaction entre sol et climat. Notons ici qu'il est important de ne pas confondre la notion de « contexte pédoclimatique » avec celle de « pédoclimat », qui désigne l'« ensemble des conditions de température et d'humidité régnant dans les horizons d'un sol, variables au cours de l'année » (Baize, 2004).

Les changements climatiques à venir auront un impact sur les différents contextes pédoclimatiques actuels, créant des conditions plus ou moins favorables à la production viticole.

Certains bassins de production historiques pourraient être interdits pour des raisons telles que le stress hydrique, l'excès de chaleur, comme il est à craindre dans le sud de France. En revanche, des opportunités de « nouveaux terroirs » pourraient se présenter dans les zones plus septentrionales ou en altitude. Cependant, pour ces nouveaux terroirs, il sera nécessaire de construire une identité propre à leur production viticole.

Une mise en correspondance des zones de production actuelles avec les cartographies de propriétés de sol à l'échelon national (GIS SOL, 2011) permet de constater que la production nationale est conduite sur des sols aux propriétés variables. Cependant, une grande partie (en volume) de cette production est menée sur des solums carbonatés ou présentant un pH proche de la neutralité, ainsi que des textures équilibrées à argileuses, comme cela peut être massivement observé dans le Languedoc (fig. I-2-2). Il est probable que cette « signature » pédologique évolue à la faveur de l'éventuelle migration des zones de production du sud vers le nord de la France. Une telle migration au niveau national autorisera toujours la production sur des sols carbonatés, comme c'est le cas aujourd'hui notamment dans de nombreux domaines du vignoble de la vallée de la Loire, mais aussi sur de nouveaux sols carbonatés, comme en atteste l'IGP Calvados en Normandie. Par ailleurs, même si la production nationale est déjà conduite sur nombre de terroirs qui présentent des sols de pH acide comme en Alsace, dans le Beaujolais ou la Corse, la migration vers le nord augmentera la quantité produite sur ces sols à pH acide tels que ceux présents sur les massifs cristallins (dont les Massif armoricain et Massif central), ainsi que sur l'ensemble des sols possédant des textures à dominante limoneuse, héritée de la ceinture lœssique du nord de l'Europe (Lautridou, 1985). Notons que la conquête du Massif central et d'autres marges montagneuses correspondra à la volonté de trouver des températures plus clémentes en altitude. En résumé, la migration possible de la viticulture vers le nord et en altitude pour faire face aux changements climatiques à venir entraînera probablement des conditions climatiques et pédologiques différentes et donc des contextes pédoclimatiques variables. Certainement, des avancées sur le matériel végétal sont nécessaires pour s'adapter à ces nouvelles conditions (cf. chapitre I-5).

Traits pédologiques communs

Même avec une variabilité pédologique élevée entre les zones de production, il est néanmoins possible de trouver des similarités, des traits pédologiques communs à de nombreux sols viticoles. La vigne est en effet une culture qui a su s'adapter à des conditions pédoclimatiques souvent difficiles, voire hostiles à d'autres productions agricoles. Sa grande plasticité lui permet de s'accommoder à des conditions édaphiques contraignantes, comme des sols pauvres en nutriments, peu profonds, de forte pierrosité ou à teneur en matières organiques faible. Cette plasticité et cette capacité d'adaptation expliquent qu'historiquement, dans de nombreuses campagnes, la vigne a constitué une culture refuge sur ces positions difficiles d'accès et/ou inadaptées aux autres formes de production agricole (García, 2010). Ces zones délaissées par les autres cultures ont laissé la place à la vigne, qui a pu s'y épanouir sur le temps long. Ainsi, elle a pu être cultivée sur des coteaux pentus, sur des sols peu profonds (Bourgogne), des terrains arides, des sols caillouteux (terrasses alluviales de la vallée du Rhône), des zones montagneuses (Savoie). La mise en culture de ces zones refuge a pu s'accompagner d'un choix d'implantation, souvent en position de versants. Ces versants cultivés sont soumis à des processus d'érosion qui modifient au cours du temps la nature des sols, leur épaisseur

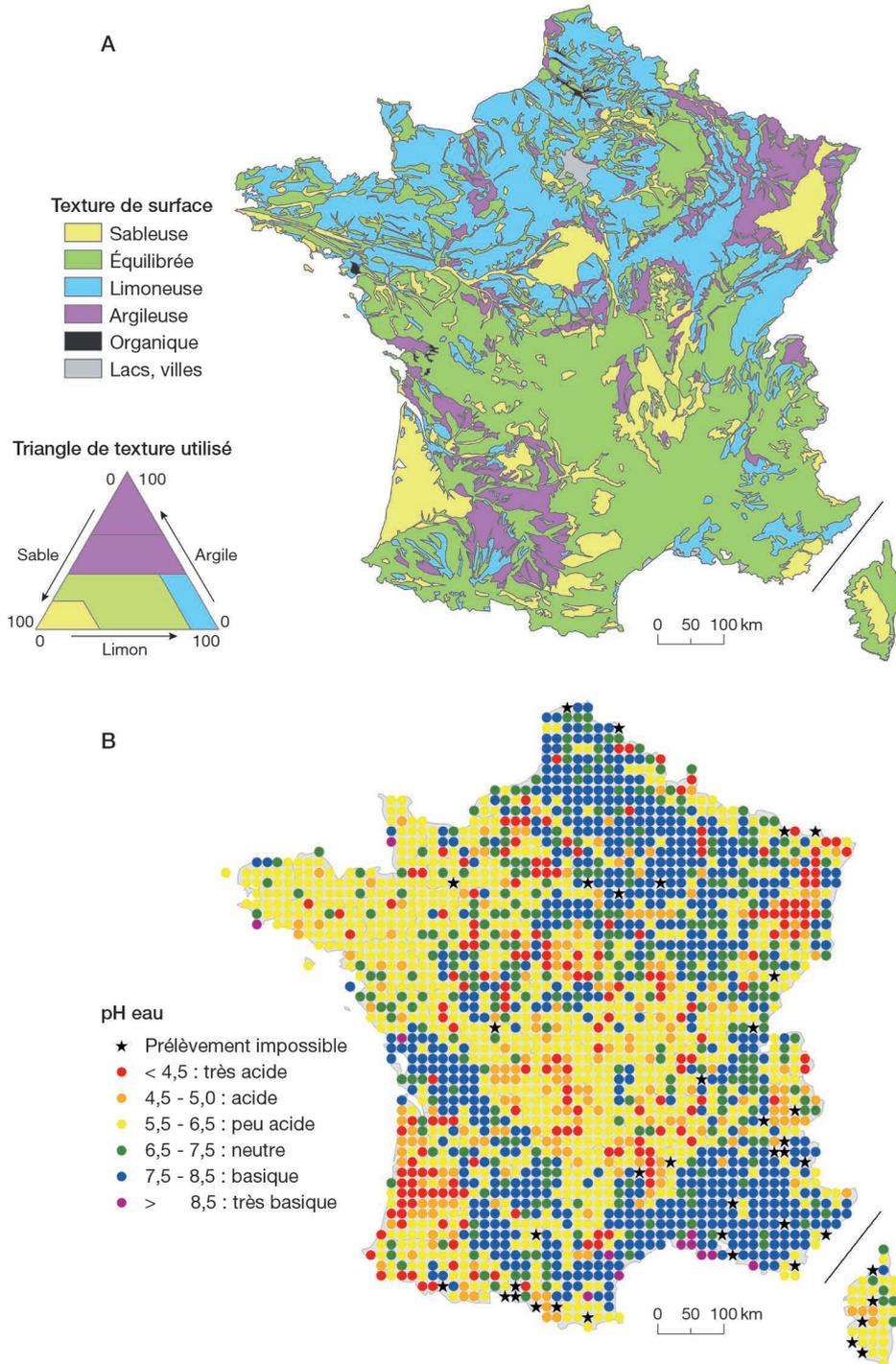


Figure I-2-2. Cartes des textures (A) et des pH_{eau} (B) des horizons supérieurs du sol en France métropolitaine. Source : GIS SOL, 2011.

et leur distribution spatiale, ce qui peut accentuer les conditions édaphiques contraignantes énoncées précédemment. En effet, en condition de pente, et sous l'action combinée du ruissellement et du travail du sol, les sols sont soumis à une dynamique sédimentaire qui se traduit par une redistribution des terres le long des versants (Follain, 2015), et une perte parfois définitive des terres fines et des éléments nutritifs vers les réseaux hydrographiques. Sur le temps long, la redistribution des constituants conduit à une évolution des propriétés des sols, dont leurs propriétés hydrodynamiques et physicochimiques. Les dynamiques sédimentaires peuvent donc profondément affecter les conditions pédoclimatiques et la qualité des vins produits.

Ce lien entre les spécificités actuelles des sols viticoles et les conflits d'usage historiques doit être pris en compte dans la construction des futurs terroirs, car rien ne garantit que la vigne ne soit pas délaissée au profit d'autres productions ou d'autres usages des terres.

Une dernière caractéristique commune des sols viticoles est leur état de dégradation, à des niveaux modérés à sévères (Rodrigo-Comino, 2018; Rodrigo-Comino *et al.*, 2020) : les stocks en matière organique sont souvent extrêmement bas, la biodiversité réduite, les sols sont tassés, ou font l'objet d'accumulations de métaux et autres résidus de traitement, etc. Aujourd'hui, cet état dégradé rend les sols viticoles plus vulnérables face aux aléas climatiques.

Les fonctions et services associés aux sols viticoles

Dans le cas d'une production agricole, la notion de fonction est proche de celle de service, dans ce sens que le bénéficiaire direct est connu. Pour faire simple, ci-après nous parlerons exclusivement de fonction. Les premières fonctions d'intérêt sont certainement celles qui soutiennent le rendement et la qualité de baies, dont les fonctions de support physique de la vigne, les fonctions d'alimentation hydrique et minérale et la fonction d'habitat pour les organismes. Il s'agit là de fonctions d'intérêt biotique ou écologique. À ces fonctions qui sont très proches du concept de fertilité des sols, nous pouvons ajouter des fonctions abiotiques, comme celles qui concourent à la notion de terroir, de patrimoine, à l'image du produit.

Les fonctions non écologiques des sols viticoles

Dans le contexte viticole, la valeur patrimoniale et culturelle des sols ne peut être négligée. Les sols viticoles et les paysages qui leur sont associés se sont construits sur le temps long. Ils reflètent une mise en valeur particulière d'un territoire par les sociétés humaines. À ce titre, ils contribuent à l'identité culturelle et historique d'un lieu. Pour exemple, le paysage parcellisé si spécifique à la Bourgogne a été façonné par l'homme au fil des siècles, créant un patrimoine culturel unique, avec les « climats » emblématiques de cette relation particulière entre le vin et le lieu (Garcia, 2010). À l'instar de la Bourgogne, les terroirs viticoles du Douro (Portugal), de Cinque Terre (Italie), Lavaud (Suisse), de Saint-Émilion, de Champagne sont désormais des patrimoines classés et protégés pour l'humanité, ce qui atteste de l'importance de leur fonction patrimoniale.

La préservation et la mise en valeur des sols viticoles deviennent aussi des enjeux patrimoniaux et culturels majeurs. Ils permettent de préserver les savoir-faire, les paysages et l'identité culturelle de la région, tout en valorisant les vins de qualité qui y sont produits.

La fonction de support physique

Sur une entrée quantitative, la fonction de support physique peut être appréciée via l'épaisseur, ou plus exactement via le volume pédologique que le vivant peut prospector. Cependant, pour la vigne, comme pour beaucoup de plantes pérennes, prendre en compte ce seul volume est imparfait car, en condition de volume terreux insuffisant, plus que l'habitabilité du volume terreux, c'est la complémentarité entre ce volume terreux de surface et les propriétés du volume géologique sous-jacent qui doit être considérée. En effet, dans le cas d'un substrat géologique induré, massif non colonisable par les racines du porte-greffe, le volume disponible à l'enracinement se limitera au volume terreux (augmentant par là même la concurrence latérale entre ceps). En revanche, dans le cas d'un volume géologique altéré, fissuré, présentant une schistosité, c'est bien de la capacité totale du continuum sol-sous-sol dont dépendra la survie des plants. Dans la réalité, à la simple prise en compte du volume terreux, il est nécessaire d'ajouter la prise en compte de la pierrosité (quantité d'éléments grossiers supérieurs à 2mm) et de la texture des sols (granulométrie de terres fines), propriétés qui modulent grandement la capacité d'enracinement de la vigne et la capacité de réservoir en eau et en nutriments du sol. Ainsi, la capacité de réservoir par unité de volume des Peyrosols, tels que ceux rencontrés sur les terrasses alluviales de la vallée du Rhône, sera limitée par leur pierrosité élevée (> 60%).



Figure I-2-3. Déchaussement d'un cep de vigne en Languedoc. © Stéphane Follain.

Cette fonction de support est aujourd'hui abîmée par les processus d'érosion des sols (érosion hydrique et érosion aratoire), qui sont responsables de pertes en terres souvent critiques sur les systèmes en pente et peuvent même conduire à la disparition progressive et irréversible des sols de versants. Dans ces conditions, les déchaussements des ceps de vignes peuvent être importants (fig. I-2-3). C'est d'ailleurs ce marqueur de l'érosion, dit de mesure de déchaussement des pieds de vigne (SUM, *Stock Unearthing Method*), qui a permis de quantifier les vitesses de dégradation des sols à une échelle pluridécennale (Brenot *et al.*, 2008 ; Casali *et al.*, 2009). Dans cette méthode, le bourrelet

de greffe est considéré comme un marqueur passif des variations topographiques, et la mise à nu du porte-greffe fournit donc une estimation de la quantité de matière qui a été érodée au niveau du cep depuis l'année de plantation. Les vitesses d'érosion établies par cette méthode sur un ensemble de parcelles viticoles de l'Hérault, de Bourgogne et du Bordelais (Brenot *et al.*, 2008; Paroissien *et al.*, 2010), sont de l'ordre de 10 à 15 tonnes par hectare et par an, et correspondent à une perte moyenne d'environ 1 mm de sol par an. Sur les versants, la perte des terres fines par les processus d'érosion hydrique et aratoire a pour conséquence la modification des fonctionnalités du sol en matière de fertilité, de biodiversité, de capacité de support. Réciproquement, les zones en pied de coteau sont souvent enrichies et plus fertiles, ce qui peut entraîner une vigueur excessive de la vigne, à l'origine de rendements plus élevés.

Les fonctions d'alimentation hydrique et minérale

Il est possible de qualifier les changements climatiques par la modification de la température et de la quantité d'eau disponible pour la vigne qui, comme nous le savons, sont des éléments clés pour le contrôle des rendements et de la qualité des baies. Rappelons par ailleurs l'idée souvent oubliée qu'en absence d'absorption d'eau il n'y a pas de flux d'éléments : une modification de l'alimentation hydrique est ainsi associée à une modification de l'alimentation minérale. Nous ne détaillerons pas ici le cas de l'alimentation et du stress hydrique, dont les effets sont présentés au chapitre I-3. Nous nous concentrerons sur l'exemple des matières organiques comme éléments clés de l'alimentation de la vigne (fig. I-2-4), car les dynamiques de minéralisation et d'humification des matières organiques par le microbiote modulent la disponibilité en éléments nutritifs pour la vigne. Pourtant, les sols viticoles sont connus pour présenter des teneurs faibles en matière organique en comparaison aux autres usages (Meersmans *et al.*, 2012). Cet état est lié pour partie à la distribution spatiale des vignobles, souvent en conditions de pentes et donc exposés aux pertes en terres par érosion hydrique, pour partie aussi au mode de gestion des adventices et des matières organiques au vignoble, avec ici et là des décennies d'arrêt des restitutions organiques et fumures et une substitution massive du désherbage mécanique par le désherbage chimique (cf. chapitre I-6).

Les transitions actuelles en termes de maîtrise des enherbements et de gestion des matières organiques sont salutaires afin de reconstituer les stocks de matière organique des sols viticoles. On notera au passage qu'au-delà de la dimension qualitative et/ou

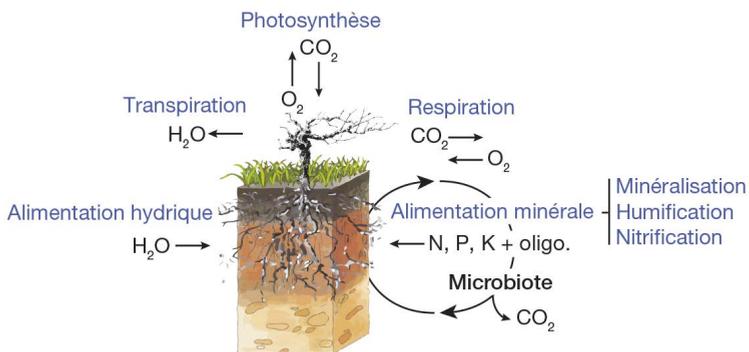


Figure I-2-4. L'alimentation de la vigne. Source : Follain, 2014.

patrimoniale, ces tendances contribuent aux politiques de séquestration plébiscitées par le 4p1000²³. Ce point est important, car les sols sont impactés par les changements globaux, mais constituent en même temps une opportunité de contrôle de ces changements. Par contre, ces efforts en termes de gestion des matières organiques devront s'accommoder des modifications des conditions d'humidité et de température des sols. Ces deux facteurs sont des catalyseurs des activités microbiennes et donc, à tout autres paramètres constants par ailleurs, les changements climatiques entraîneront une modification des dynamiques de minéralisation et d'humification des matières organiques. Ce qui modulera de fait le stock en matière organique des sols et donc leurs propriétés physicochimiques et la disponibilité en éléments nutritifs pour la vigne. Enfin, en considérant les dépendances fortes entre activités microbiennes, dynamique du carbone, de l'azote, et autres éléments d'intérêt, on doit admettre que ce sont globalement les référentiels de fertilité qu'il faudra réviser à l'avenir.

De la cartographie des terroirs à celle des fonctionnements

Comme le rappelle la définition de l'Organisation internationale de la vigne et du vin (OIV, 2010), le terroir intègre tout aussi bien les caractéristiques, les spécificités des sols que les éléments liés au relief (topographie), au climat, au paysage ainsi qu'à la biodiversité. On comprend de fait que le terroir est très fortement lié au territoire, à l'espace géographique, et à la nécessité d'en comprendre les variabilités (Vaudour, 2002). Ces conditions étant connues localement, de nombreux travaux ont fait progresser nos connaissances sur les relations terroir-vigne-vin (Morlat, 1989; Van Leeuwen et Seguin, 1994), autrement dit sur les relations entre, d'une part, les propriétés et fonctionnements du sol qui conditionnent l'alimentation hydrique et minérale de la vigne et, d'autre part, les propriétés des baies et des vins.

Mises en place dès 1935 par l'Inao afin de garantir la provenance et la qualité des vins (Barham, 2018), les AOC avaient à l'origine des limites plutôt administratives. Aujourd'hui, les délimitations, les zonages intègrent de plus en plus les variations du milieu biophysiques, ce qui laisse l'opportunité de développer des approches plus techniques fondées sur le relevé, la quantification de variables d'état du système viticole du terroir, afin de discriminer des unités de terroir naturel (UTN) (Laville, 1993) ou des unités de terroir de base (Morlat, 1989). Ces approches ont été reprises par Carbonneau (2001), qui y intègre les interactions avec les cépages et les technologies viticoles et œnologiques, afin de proposer l'unité de terroir viticole (UTV). Désormais, des travaux mettent l'accent, non pas sur une division de l'espace fondée sur des variables d'état, mais bien sur une prise en compte des fonctions des sols via le concept d'unité pédo-fonctionnelle (ou SFU, *Soil Functional Unit*; Fayolle et al., 2019). La mise en application de ces approches fonctionnelles doit permettre d'identifier et, pourquoi pas, de piloter l'évolution des relations sol-vigne-climat.

23. «L'initiative internationale "4 pour 1000"», lancée par la France le 1^{er} décembre 2015 lors de la COP21, vise à montrer que l'agriculture, et en particulier les sols agricoles, peuvent jouer un rôle crucial en matière de sécurité alimentaire et de changement climatique», <https://4p1000.org>.

Conclusion

Les sols agricoles représentent une ressource rare et finie à l'échelle mondiale. Comme toutes les productions agricoles, la production vitivinicole devra trouver un équilibre entre utilisation et préservation de cette ressource. Ce défi d'une utilisation durable des terres devra être relevé sur fond de changements climatiques et socioéconomiques. Certains terroirs verront disparaître la vigne, tandis que d'autres devront apprendre à la maîtriser avec une viticulture fondée sur l'usage de moins d'intrants chimiques et de moins d'énergie (tout du moins fossile), qui maximise les interactions biotiques et abiotiques.

EFFETS DE L'ÉLÉVATION DES TEMPÉRATURES ET DU DÉFICIT HYDRIQUE SUR LA VIGNE

Cornelis Van Leeuwen, Thierry Simonneau et Chloé Delmas

Introduction

Comme pour toute autre culture, la physiologie de la vigne est impactée par les facteurs abiotiques comme la température, la disponibilité en eau et en minéraux, le rayonnement, l'hygrométrie et la teneur en CO₂ de l'atmosphère (Jackson et Lombard, 1993). Contrairement à d'autres cultures, la valorisation de la production dépend plus des prix de vente (en relation avec la qualité et la renommée du vin produit) que des rendements. En effet, le prix d'une bouteille de vin est plus variable (de quelques euros à des centaines d'euros) que les rendements (de 3 à 30 tonnes par hectare). Il est donc au moins aussi important de s'intéresser aux effets des facteurs climatiques sur la qualité de la production que sur le rendement. Le changement climatique induit une hausse de la température dans toutes les régions productrices de vin et une intensification de la contrainte hydrique dans la majorité des bassins de production. Il est donc à même de modifier très fortement la phénologie et la physiologie de la vigne ainsi que ses interactions avec les bioagresseurs (ravageurs, agents pathogènes). Cela est d'autant plus vrai que l'intensité et la fréquence croissantes des épisodes de sécheresse vont amplifier les effets du réchauffement global. C'est le résultat attendu de la baisse de transpiration observée en conditions de sécheresse, qui prive la plante de l'effet physique de refroidissement lié à l'évaporation de l'eau. Dans ce chapitre, on tente de démêler les impacts respectifs des vagues de chaleur et des épisodes de sécheresse, bien qu'ils se combinent le plus souvent dans les vignobles.

Les effets marquants de l'augmentation de la température sur le comportement de la vigne

Le comportement de la vigne est très fortement influencé par la température. Celle-ci agit sur des processus majeurs comme la photosynthèse et une augmentation de la température avance les stades phénologiques. Elle peut aussi modifier le rendement et influencer la composition du raisin, à la fois en métabolites primaires et en métabolites secondaires.

La photosynthèse

La photosynthèse constitue le processus central par lequel la plante produit les molécules à l'origine de l'ensemble de ses constituants organiques. Ces constituants jouent

des rôles fondamentaux à tous les niveaux, depuis la mise en place des structures végétales, en passant par la fourniture d'énergie nécessaire à toute cellule vivante, jusqu'à l'accumulation des sucres et des acides organiques dans les baies.

Même si la photosynthèse dépend avant tout de la quantité de rayonnement captée par le feuillage, elle est très sensible à la température. En effet, ce processus complexe repose sur une cascade de réactions enzymatiques qui sont activées par la lumière mais aussi par l'augmentation de la température (Bernacchi *et al.*, 2001). De nombreux travaux ont cherché à caractériser l'impact de la température sur la capacité photosynthétique maximale lorsqu'aucun autre facteur, en particulier la lumière ou la disponibilité de l'eau dans le sol, n'est limitant. Comme attendu, une augmentation modérée de la température entraîne une augmentation de la photosynthèse maximale permise par la lumière (fig. I-3-1). Cependant, cet effet favorable de la température disparaît au-delà d'une valeur optimale voisine de 30°C (Greer et Weedon, 2012) et les températures supérieures à cet optimum deviennent défavorables. Dans un contexte de changement climatique où ce seuil sera de plus en plus souvent dépassé, il faut donc s'attendre à des diminutions marquées de la photosynthèse.

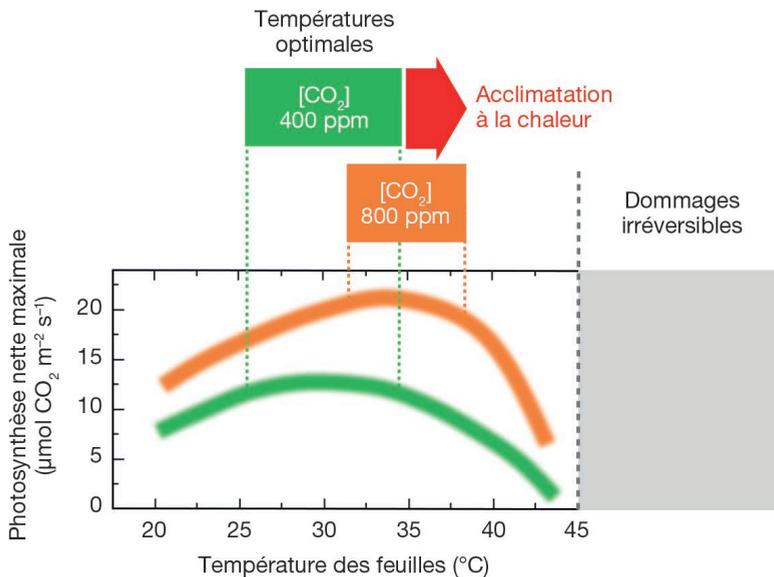


Figure I-3-1. Effet de la température des feuilles sur la photosynthèse nette maximale (sans limitation par la lumière ni par la disponibilité de l'eau dans le sol).

La température optimale varie selon les conditions moyennes de croissance des plantes : l'augmentation moyenne de la température déplace la réponse dans le sens indiqué par la flèche rouge ; l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique déplace la réponse de la photosynthèse depuis la courbe verte (pour 400 ppm de CO_2) jusqu'à la courbe orange pour 800 ppm de CO_2 . D'après Greer et Weedon, 2012 ; Greer, 2018.

Lorsque l'augmentation de température reste modérée (d'une dizaine de degrés au-dessus de l'optimum), les baisses de photosynthèse restent réversibles (Edwards *et al.*, 2011), car la principale limitation se rapporte plutôt à la diffusion du CO_2 d'origine atmosphérique vers l'intérieur des feuilles. Or, cette diffusion se fait à travers les orifices stomatiques situés à la surface des feuilles et qui se ferment sous l'effet de la baisse

d'humidité relative de l'air induite par l'élévation de température (Greer, 2018). Dès que la vague de chaleur s'estompe, les stomates s'ouvrent à nouveau et les pertes de photosynthèse restent alors limitées. Il faut noter également que si la vague de chaleur se prolonge, la plante s'acclimata et la température optimale augmente, ce qui limite là encore l'effet d'une vague de chaleur sur la photosynthèse. Cette acclimatation s'observe aussi sous l'effet de l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ (Greer, 2018). Cependant, le rythme actuel d'élévation de la concentration atmosphérique en CO₂ ne va que légèrement augmenter la température optimale.

Lorsque la température devient très élevée (au-delà de 45°C environ), les dégâts sur les constituants biochimiques qui assurent la photosynthèse (notamment les photosystèmes et les membranes; Sun *et al.*, 2017) deviennent irréversibles (Wise *et al.*, 2004). Les dégâts sont accentués lorsque le rayonnement est élevé en été et aussi en conditions de stress hydrique sévère. Un ombrage peut alors atténuer les dégâts (Greer *et al.*, 2011). Par contre, en l'absence de mesure d'atténuation de ces températures extrêmes, les pertes de photosynthèse persistent après la vague de chaleur et les impacts attendus sont importants pour l'année en cours ou pour la récolte suivante, voire pour la pérennité du vignoble.

La croissance végétative

La température agit sur la croissance végétative des plantes comme sur de nombreux autres processus. Son augmentation est favorable jusqu'à un certain seuil de température au-delà duquel la croissance est réduite (Keller et Tarara, 2010), voire inhibée, suivant un modèle en cloche bien décrit par la loi d'Arrhenius (Parent et Tardieu, 2012). De nombreuses espèces suivent ce modèle avec un seuil de température optimale pour la croissance qui varie peu au sein d'une même espèce, mais davantage entre espèces (de 25 à 35°C; Parent et Tardieu, 2012), en lien avec les climats d'origine.

Il faut noter que les expérimentations qui permettent de séparer l'effet de la température de celui de la baisse d'hygrométrie sont assez rares, notamment pour les plantes pérennes où les expérimentations en conditions contrôlées sont plus complexes. En conditions naturelles, les vagues de chaleur entraînent de fortes baisses d'hygrométrie du fait des propriétés physiques de l'air, de telle sorte que c'est plutôt l'impact du déficit hydrique atmosphérique qui inhibe la croissance foliaire, très sensible à ce facteur (voir plus loin, « La croissance des rameaux »).

L'augmentation des températures a donc des effets parallèles sur la photosynthèse, source des diverses molécules organiques, et sur la croissance des parties végétatives qui utilise ces produits. On pourrait ainsi conclure à un faible impact grâce au maintien d'un certain équilibre entre source et puits pour les produits de la photosynthèse. Cependant, l'augmentation des températures accélère la photorespiration ainsi que la respiration foliaire et racinaire, ce qui affecte aussi bien l'activité des sources que celle des puits, et l'effet global résultant est donc négatif (Escalona *et al.*, 2012). Les vagues de chaleur extrême accentuent ce déséquilibre en créant des dommages irréversibles sur le feuillage (Edwards *et al.*, 2011; voir encadré I-3-1). Cela abaisse le niveau des réserves carbonées dans la plante (Kliewer *et al.*, 1972), ce qui fragilise certaines étapes de l'élaboration du rendement (voir plus loin, « Effet sur le rendement ») et menace la pérennité du vignoble (Smith et Holzzapfel, 2009).

La phénologie

La température a un effet déterminant sur la phénologie des plantes (Cleland *et al.*, 2007). La reconstruction des températures passées à l'aide de dates de vendange (Chuine *et al.*, 2004) et l'élaboration de modèles phénologiques nous permettent d'entrevoir quel pourrait être leur impact futur sur ce point.

Modifications déjà observées

Comme le montre une très longue série de données d'observation de la phénologie en Alsace, l'augmentation des températures sous l'effet du changement climatique conduit à un avancement des stades phénologiques de la vigne (fig. I-3-2). Dans cette région, sur une période de 70 ans, le débourrement a été avancé de 10 jours, la floraison de 23 jours, la véraison de 39 jours et la récolte de 25 jours. Des évolutions similaires sont rapportées dans de nombreuses régions viticoles du monde (Van Leeuwen et Darriet, 2016). Or, l'avancement du débourrement expose la vigne à une plus longue période de risque de gel printanier, sans qu'il soit toutefois possible de conclure avec certitude si ce risque de gel augmentera ou diminuera (Sgubin *et al.*, 2018; voir aussi plus loin dans le chapitre, le développement sur le risque de gel). L'avance de la véraison expose pour sa part les grappes à une forte augmentation des températures, car à la hausse globale de la température de l'air s'ajoute le fait que la maturation se déroule désormais dans une période de l'année où les températures sont aussi naturellement plus élevées, comme l'ont montré Molitor et Junk (2019). Ces auteurs estiment que, pour chaque degré d'augmentation de la température sous l'effet du changement climatique, cette avancée de la phénologie conduit à une augmentation d'environ deux degrés sur la période de maturation. Cette évolution exerce un très fort effet sur la composition du raisin en métabolites primaires (Duchêne et Schneider, 2005) et secondaires (Spayd *et al.*, 2002; Van Leeuwen *et al.*, 2022), et a un effet important sur la qualité et la typicité des vins produits.

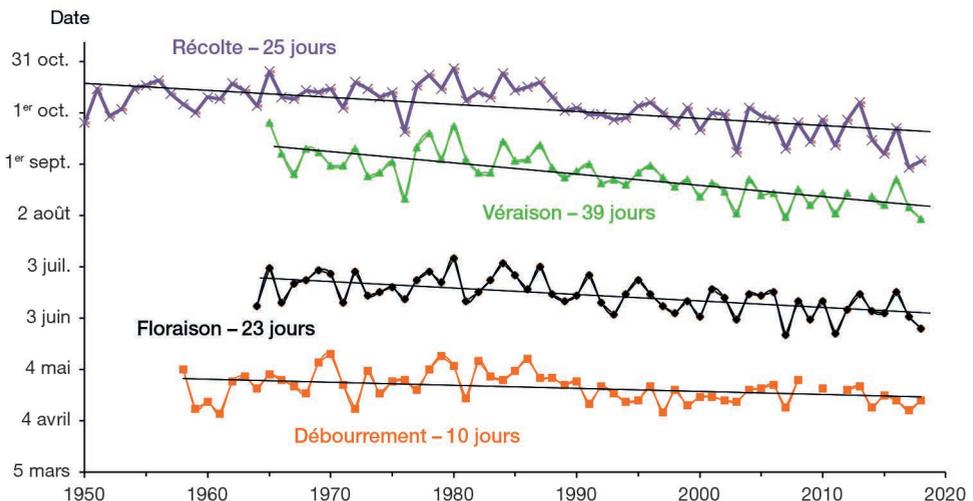


Figure I-3-2. Évolution des stades phénologiques en Alsace de 1950 à 2020. Source : données de 1950 à 2005 publiées par Duchêne et Schneider (2005), complétées par l'auteur pour 2005 à 2020.

Évolution future de la phénologie de la vigne

De nombreux modèles ont été développés pour simuler la phénologie de la vigne, parmi lesquels on peut citer le *Grapevine Flowering Veraison model* (GFV; Parker et al., 2011 et 2013) et le *Grapevine Sugar Ripeness model* (GSR; Parker et al., 2020a). À l'aide de ces modèles et des projections de température pour différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, il est possible de prévoir les futures évolutions de la phénologie de la vigne. Toutes les projections s'accordent sur le fait que l'avancée de la phénologie va se poursuivre. Un exemple pour la région Champagne est donné dans la figure I-3-3 (d'après Parker et al., 2020b).

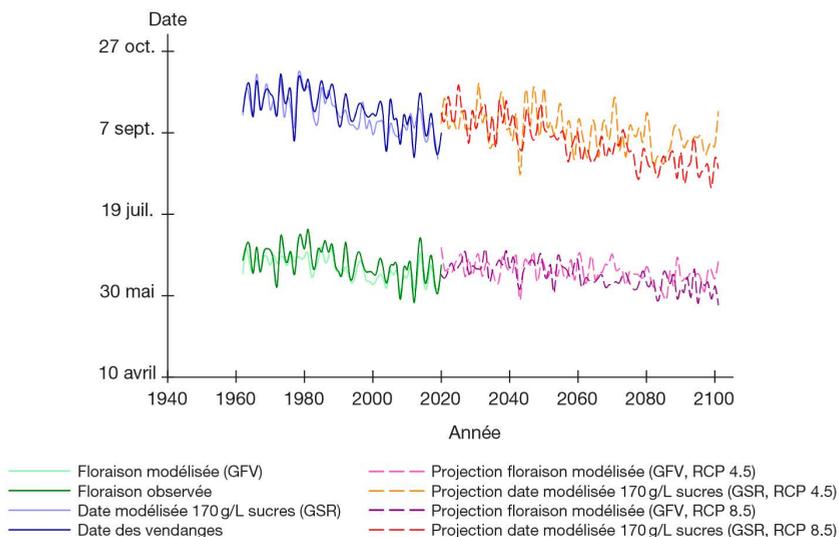


Figure I-3-3. Dates observées de mi-floraison (vert foncé) et de récolte (bleu foncé) pour la période historique, et dates modélisées de mi-floraison (vert clair) et dates modélisées où la teneur en sucres du raisin atteint 170 g/L (bleu clair) pour la région Champagne. Projections modélisées des dates de mi-floraison pour la fin du XXI^e siècle (ligne rouge discontinue) et des dates où la teneur en sucres atteint 170 g/L (ligne orange discontinue) pour le scénario d'émissions de gaz à effet de serre RCP 4.5. Source : Parker et al., 2020b.

Le rendement

Une vague de chaleur peut altérer toutes les composantes du rendement. La fertilité (nombre de grappes par rameau) peut déjà être réduite par une température excessive dès l'année qui précède la récolte, lorsque les ébauches d'inflorescences sont initiées. Cela est probablement lié à la compétition pour les produits de la photosynthèse entre ces ébauches, fortement consommatrices à ce stade (Lebon et al., 2008), et les parties végétatives dont la croissance et la respiration sont activées par l'augmentation de température. Un contrôle de la vigueur associé à une charge en fruits limitée pourrait permettre de limiter cette compétition.

La floribondité (nombre de fleurs par inflorescence) est également très sensible à une élévation trop importante de température (Ebadi et al., 1995), notamment si elle est très précoce (Keller et al., 2010). Autour de la floraison, une augmentation de la température

au-dessus de 35°C en journée gêne la fécondation en altérant la fertilité des ovules (Kliwer, 1977) et la performance du pollen (Rajasekaran et Mullins, 1985). Là encore, une des causes probables est la forte dépendance de ces processus vis-à-vis des réserves carbonées (Lebon *et al.*, 2008; Greer et Weston, 2010), elles-mêmes altérées par les vagues de chaleur (voir plus haut, « La croissance végétative »). Un niveau trop faible des réserves carbonées suite à une augmentation de température peut également provoquer des avortements plus nombreux lors de la nouaison ou peu après (Greer et Weston, 2010; Pagay et Collins, 2017).

Enfin, avec des températures moyennes supérieures à 30°C l'année de la récolte, la taille finale et le poids des baies sont réduits (Hale et Buttrose, 1974; Greer et Weston, 2010). Cet effet est particulièrement marqué lorsque l'élévation de température a lieu avant la phase de maturation (Matsui *et al.*, 1986). Il peut en partie s'expliquer par un blocage de l'expansion cellulaire dans les baies pendant leur phase de croissance herbacée et jusqu'à la véraison (Rienth *et al.*, 2014). Mais les fortes températures induisent aussi des pertes d'eau plus importantes par la plante et dans les baies qui peuvent alors flétrir, ce qui réduit le volume produit sans nécessairement abaisser la quantité de sucres récoltée (Ollat *et al.*, 2002). Pour les augmentations les plus fortes de température, telles qu'on les observe notamment sur les grappes les plus exposées au soleil (jusqu'à 18°C de plus que la température de l'air), des pertes importantes de récolte peuvent également être observées par brûlure des baies (Gambetta *et al.*, 2021; voir encadré I-3-1).

Enfin, une synthèse de plusieurs études montre que les effets du réchauffement planétaire sur le rendement sont davantage à craindre dans l'augmentation de la fréquence des pics de chaleur plutôt que dans l'augmentation moyenne de la température (Sadras *et al.*, 2017).

La composition du raisin et ses métabolites primaires

La composition des raisins et des vins a évolué de manière spectaculaire sur les quatre dernières décennies. Si, jusqu'à la fin du xx^e siècle, le manque de sucre et l'excès d'acidité dans le raisin étaient un problème récurrent dans de nombreuses régions viticoles, conduisant à une généralisation des pratiques comme la chaptalisation (ajout de sucre dans le moût pour atteindre le degré d'alcool souhaité dans le vin), les viticulteurs sont aujourd'hui confrontés à des teneurs en sucres excessives et des acidités trop faibles.

Modifications déjà observées

Depuis 1984, un grand laboratoire du Languedoc (Dubernet, à Montredon-des-Corbières) calcule tous les ans le degré, le pH et l'acidité totale observés en moyenne sur tous les vins jeunes du millésime analysés. Il en ressort que le degré alcoolique des vins dans cette région est passé de 11 à 14%, que l'acidité a perdu 1,5 g d'acide tartrique/L et que le pH est passé de 3,5 à 3,75 en 40 ans (fig. I-3-4). Des évolutions similaires sont rapportées dans des régions viticoles du monde entier (Schultz, 2000; Jones *et al.*, 2005; Ollat *et al.*, 2017). Cette évolution n'est bien entendu pas seulement la conséquence du changement climatique, mais intègre aussi des modifications de l'encépagement, l'introduction de clones produisant plus de sucre, des modifications des systèmes de conduite et du rapport feuille/fruit, ainsi que les choix des dates de vendange. Des études manquent aujourd'hui pour évaluer la part attribuable au changement climatique de l'évolution de la composition du raisin à maturité.

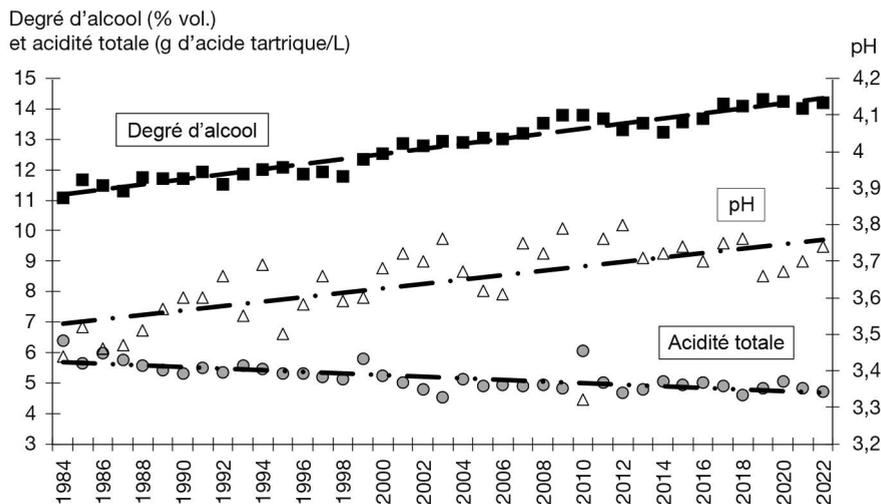


Figure I-3-4. Évolution de la composition du vin rouge en Languedoc de 1984 à 2022. Chaque point est la moyenne de milliers d'analyses de vin juste après la fermentation alcoolique. Données : laboratoire Dubernet, 11100 Montredon-des-Corbières.

Tendance de l'évolution de la teneur en sucres basée sur les températures et le CO₂ atmosphérique

De nombreux modèles ont été développés pour simuler l'accumulation du sucre dans le raisin (Dai et al., 2009; Parker et al., 2020a; Suter et al., 2021). Ils permettent de prévoir l'évolution de la teneur en sucres du raisin pour différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (Parker et al., 2020b; fig. I-3-4). Il est probable que cette évolution de la composition du raisin va se poursuivre dans les années à venir. Peu d'études sont consacrées à l'effet de l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Les premiers résultats de l'expérimentation Face²⁴ à Geisenheim (Allemagne) ne semblent pas indiquer un effet majeur de ce paramètre (Wohlfahrt et al., 2021), mais il faut préciser que l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'air était de seulement 20% dans ce dispositif.

La composition du raisin et ses métabolites secondaires

La qualité et la typicité du vin dépendent fortement de la composition en métabolites secondaires au moment de la récolte. La température a alors un effet majeur sur la présence et la richesse de ces composés dans le raisin.

Une forte influence de la température sur la teneur en composés phénoliques du raisin

La température exerce un effet très net sur l'accumulation de composés phénoliques dans le raisin et en particulier sur les anthocyanes. Les raisins accumulent moins d'anthocyanes si les températures sont élevées, en particulier pendant la nuit (Kliewer et Torres, 1972). De nombreuses études publiées sur le sujet ont pour objet des expérimentations d'effeuillage. Dans ce type d'essai, il n'est cependant pas facile de séparer l'effet de la

24. Free Atmospheric CO₂ Enrichment.

lumière et celui de la température, car sur les modalités effeuillées, les grappes sont à la fois plus chaudes et exposées à une plus forte luminosité. Dans une expérimentation très astucieuse, où ils ont refroidi des grappes de la modalité effeuillée et réchauffé des grappes de la modalité non effeuillée, Spayd *et al.* (2002) ont pu établir sans ambiguïté que le rayonnement direct favorise, alors que de fortes températures limitent, l'accumulation d'anthocyanes. Les mécanismes pouvant expliquer l'effet des fortes températures sur la synthèse et la dégradation des composés phénoliques ont été présentés par Gouot *et al.* (2019a).

Effet de la température sur les arômes du raisin et du vin

La température présente également un très fort effet sur les précurseurs d'arômes du raisin et l'arôme du vin (Van Leeuwen *et al.*, 2020). Les fortes températures diminuent les arômes herbacés, comme les méthoxypyrazines (Koch *et al.*, 2012) et le 1,8-cinéole (Poitou *et al.*, 2017). En revanche, elles favorisent les arômes de fruit cuit (Pons *et al.*, 2017), mais aussi des composés induisant un bouquet de vieillissement complexe, comme le sulfure de diméthyle (DMS) et les hétérocycles aromatiques (Le Menn *et al.*, 2019). Les thiols volatiles (arômes fruités) sont plutôt négativement impactés (Wu *et al.*, 2019), alors que l'effet de la température sur les monoterpènes est variable (Duchêne *et al.*, 2016). Les effets de la température sur les arômes du raisin et du vin sont résumés dans le tableau I-3-1.

L'effet de la température sur les métabolites secondaires est traité plus en détail dans le chapitre suivant.

Le risque de gel : un phénomène complexe

L'avancement du débourrement augmente la période de risque de gel de printemps pour la vigne. Cependant, la fréquence des dégâts de gel dépend également de la date de la dernière gelée, qui elle-même avance dans la plupart des régions. D'après Sgubin *et al.* (2018), le risque de gel de printemps pour la vigne augmentera dans les vignobles continentaux (Bourgogne, Champagne), restera stable dans les vignobles atlantiques (Bordeaux, Cognac, Val de Loire) et diminuera dans les vignobles méridionaux (Côtes du Rhône, Languedoc, Provence). Cependant, ces auteurs signalent une forte incertitude sur ces prévisions à cause de la difficulté de modéliser le débournement de la vigne. Ces difficultés de prévision du risque de gel sont aussi soulignées par Gavrilesco *et al.* (2022).

Le risque des vagues de chaleur

La vigne supporte assez bien des températures jusqu'à 40°C, mais sa physiologie est fortement perturbée par des températures au-dessus de 45°C (Gouot *et al.*, 2019b). Les vagues de chaleur, qui peuvent se présenter à différents moments de la saison, sont de plus en plus fréquentes dans un contexte de changement climatique. Ce phénomène est bien connu en Californie, où des vagues de chaleur peu de temps avant les vendanges (septembre) peuvent avoir un effet particulièrement négatif sur la quantité et la qualité de la récolte, en provoquant un fort flétrissement des baies. Les risques d'échaudage sont accentués lorsque les grappes sont directement exposées au rayonnement par forte chaleur (encadré I-3-1).

Tableau I-3-1. Effets du déficit hydrique de la vigne et de l'augmentation de la température de l'air sur les composés aromatiques des raisins et des vins. Les cases du tableau apparaissent en bleu si la teneur des composés diminue avec le facteur considéré et en rouge si elle augmente. Source : Van Leeuwen et al., 2020.

	Composé ou famille aromatique	Augmentation de la température de l'air	Déficit hydrique
Arômes végétaux et poivrés	IBMP	Diminution	Diminution
	(-)-rotundone	Diminution	Diminution
	1,8-cinéole	Diminution	Diminution
Autres monoterpènes		Effet variable	Effet variable
Thiols volatils et C ₁₃ -norisoprénoïdes	Thiols volatils	Diminution	Augmentation si déficit modéré
	TDN	Augmentation	Augmentation
	Tabanones	Augmentation	Augmentation
	Autres C ₁₃ -norisoprénoïdes	Aucun effet	Augmentation
Arômes de fruits cuits		Augmentation	Augmentation possible par déshydratation
Esters		Pas encore étudié	Augmentation
Autres composés	DMS	Augmentation	Augmentation
	<i>Red wine aging bouquet</i>	Susceptible d'augmenter	Augmentation
	o-aminoacétophénone	Pas encore étudié	Augmentation
	Glutathione	Augmentation	Diminution
	Tanins	Aucun effet reproductible signalé	Augmentation

Les effets de l'augmentation de la contrainte hydrique

L'intensité de la contrainte hydrique influence très fortement le fonctionnement de la vigne. Forte, elle pénalise le rendement mais, à l'exception des situations de stress hydrique prononcé, améliore aussi la qualité du vin produit.

La photosynthèse

Chez la vigne comme chez les autres espèces, une contrainte hydrique entraîne une baisse de photosynthèse (fig. I-3-5A) selon des mécanismes assez bien connus (Maroco et al., 2002). Même pour des contraintes assez poussées, c'est surtout la fermeture des pores à la surface des feuilles, les stomates, qui conduit à la baisse de photosynthèse (Flexas et al., 1998 ; Gambetta et al., 2020). En effet, leur ouverture est nécessaire pour alimenter les enzymes photosynthétiques qui assimilent le CO₂ en provenance de l'air. Or, cela s'accompagne inévitablement de pertes d'eau par la plante, d'autant plus fortes que l'atmosphère est sèche. Pour éviter la déshydratation qui pourrait leur être fatale, les plantes ont donc développé une mécanique complexe qui permet de réguler les pertes

Encadré I-3-1. Coup de chaleur du 28 juin 2019 : quels enseignements ?

Le 28 juin 2019, un pic de chaleur soudain, intense et inédit frappait les vignobles du Gard et de l'Hérault, provoquant de graves dégâts sur les vignes. Une analyse des facteurs aggravants ou atténuants a alors été entreprise.

Les déclarations de 1 500 vignerons sinistrés ont été recueillies par les chambres d'Agriculture, complétées par des données fournies par SudVinBio, Groupama et Pacifica. Avec le soutien de la direction départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) de l'Hérault, plus de 2 000 situations ont été compilées et analysées par des scientifiques du groupement de recherche *Vine & Wine Sciences* de Montpellier.

Les pertes de rendement déclarées ont varié autour de 33%, en cohérence avec les expertises des compagnies d'assurance. Davantage de brûlures ont été observées sur les faces ouest des rangs orientés nord-sud, et plus souvent sur les grappes exposées et proches du sol que sur le feuillage, laissant parfois préservées les extrémités de rameaux.

L'intensité des dégâts a été d'abord liée à la température de l'air, qui a culminé à 46,2°C en milieu d'après-midi, mais d'autres facteurs ont joué un rôle important, car de forts contrastes entre parcelles proches ont été observés. Ni le déficit hydrique dans le sol, modéré au moment du pic de chaleur, ni l'irrigation ne sont apparus comme facteurs explicatifs dominants sur la variabilité des dégâts. Par contre, cette variabilité est apparue corrélée avec les variations locales du pouvoir évaporant de l'air (plus que doublé lorsque la température de l'air est passée de 35 à 45°C), suggérant une incapacité des plantes à compenser l'eau qui s'évaporait des feuilles ou des fruits. De manière plus inattendue, le vent, bien que relativement faible, a eu un effet atténuant (malgré tout rafraîchissant), notamment lorsqu'il dépassait 10 km/h. Le même jour, des différences variétales de sensibilité au pic de chaleur ont été notées à Montpellier sur près de 300 variétés en pots. Au champ, le Carignan a été surreprésenté dans les déclarations. Cependant, ce cépage était souvent associé à des traitements au soufre qui ont augmenté les pertes déclarées.

Des enquêtes complémentaires ont mis à jour d'autres facteurs suspectés d'aggraver les dégâts (sols superficiels, bordures nues à l'ouest ou obstacles à l'est des parcelles) ou de les atténuer (sols à forte réserve utile, proximité de plans d'eau).

En fin d'étude, un principe de recommandations au cas par cas a été proposé. Ainsi, avec plus de 43°C et moins de 10 km/h de vent annoncés, les traitements au soufre et les effeuillages sont déconseillés, alors qu'un travail sur l'interrang est recommandé pour en modifier l'albédo et les pertes d'eau par évaporation. Des aménagements à plus long terme ont été proposés pour les situations les plus fragiles. Plus de détails peuvent être trouvés sur : https://www6.inrae.fr/Laccave/content/download/3466/35052/version/2/file/Canicule_Simonneau_25112021.pdf (consulté le 25/02/2023).

d'eau en réduisant l'ouverture des stomates (Tombesi *et al.*, 2015). Cette réponse, particulièrement efficace chez la vigne (Hochberg *et al.*, 2017 ; Charrier *et al.*, 2018), résulte à la fois d'une baisse de turgescence dans les feuilles, qui permettrait des réponses rapides et réversibles, et de l'activation de processus biochimiques avec, dans un rôle central, une hormone caractéristique des situations de contrainte hydrique, l'acide abscissique (Tardieu et Simonneau, 1998). Cette complexité de mécanismes pourrait être à l'origine des différences de comportement observées entre variétés (Prieto *et al.*, 2010 ; Coupel-Ledru *et al.*, 2017), avec un rôle du porte-greffe (Peccoux *et al.*, 2018).

Finalement, la baisse de photosynthèse suit d'assez près la fermeture stomatique lorsque le sol se dessèche (Medrano *et al.*, 2003 ; Pellegrino *et al.*, 2006 ; Lovisolo *et al.*, 2010).

L'augmentation du déficit de saturation de l'air (une mesure de la sécheresse atmosphérique) amplifie cette réponse (Prieto *et al.*, 2010), qui reste réversible dans une large gamme de conditions (Flexas *et al.*, 2009). Seule une déshydratation sévère et brutale, ou modérée mais prolongée, peut altérer le métabolisme photosynthétique (Flexas *et al.*, 2009). Les pertes en eau sont régulées par l'augmentation de la résistance stomatique et hydraulique au flux de sève, mais cela peut provoquer l'affaiblissement de la plante à cause de l'impact sur l'assimilation carbonée.

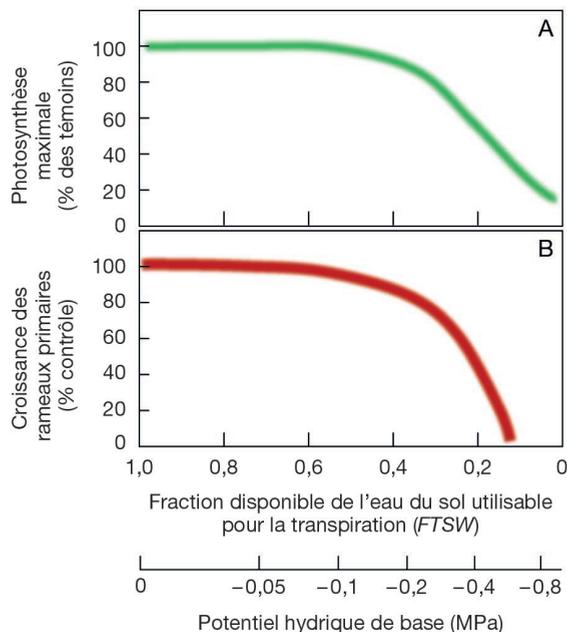


Figure 1-3-5. Réponses de la photosynthèse maximale, non limitée par la lumière (A), et de la croissance des rameaux primaires (B) au dessèchement du sol mesuré par la fraction de l'eau transpirable (FTSW en anglais) ou par le potentiel hydrique de base. D'après Pellegrino *et al.*, 2006; Baeza *et al.*, 2007.

La résistance à la sécheresse de l'appareil vasculaire de la vigne est relativement modeste, le rendant vulnérable lorsque la tension de l'eau dans le xylème se développe au-delà de -2 à -3 MPa (mégapascal), ce qui est susceptible d'engendrer de l'embolie vasculaire (Lamarque *et al.*, 2023). Afin d'éviter ce phénomène, la vigne possède, d'une part, un enracinement profond lui permettant d'avoir un accès à l'eau qui limite ces tensions xylémiennes et, d'autre part, un contrôle stomatique très précoce. Des observations à long terme à Napa en Californie (entre 2010 et 2016, sur Cabernet-Sauvignon, Cabernet franc, Syrah et Merlot) et à Bordeaux (entre 2003 et 2016, sur Cabernet franc et Merlot) ont révélé que les vignes n'ont jamais atteint leurs seuils de potentiel hydrique létal lors de sécheresses saisonnières (Charrier *et al.*, 2018). À l'occasion de sécheresses très sévères, les phénomènes d'embolie vasculaire sont toutefois observés dans les organes périphériques, tels que les pétioles, engendrant une chute prématurée de feuilles et une diminution de la transpiration (Charrier *et al.*, 2016; Charrier *et al.*, 2018). La baisse d'assimilation carbonée (réduction des échanges gazeux) qui s'ensuit peut alors nuire à la pérennité du vignoble lorsque les sécheresses se répètent.

La croissance des rameaux

La croissance des rameaux (notamment les rameaux secondaires) est rapidement affectée par des niveaux de contrainte hydrique modérés, bien avant que la photosynthèse ne soit fortement modifiée (Pellegrino *et al.*, 2006; fig. I-3-5B). Les produits de la photosynthèse peuvent alors s'accumuler sous forme de réserves, comme cela a été montré chez les arbres (McDowell, 2011). Ces réserves seront mobilisées lorsque le déficit se prolonge, pour en atténuer l'impact (Rogiers *et al.*, 2011). De ce fait, les réductions de croissance observées une année donnée sont souvent décorrélées des pertes de rendement.

L'arrêt de croissance des rameaux permet donc de détecter précocement l'apparition d'un déficit hydrique. Le phénomène résulte à la fois de la baisse de turgescence nécessaire à la croissance cellulaire, mais aussi de la modification de l'activité d'un grand nombre de protéines qui contribuent alors au ralentissement des divisions cellulaires ou de l'expansion des parois cellulaires (Cramer *et al.*, 2013). Suite à ce blocage de croissance des rameaux, la surface foliaire se trouve limitée. Ajouté à l'effet de la fermeture stomatique, cet effet réduit davantage la photosynthèse de la plante.

La production de raisins

Comme les vagues de chaleur, la contrainte hydrique peut altérer toutes les composantes du rendement. Dès l'année qui précède la récolte, si une contrainte hydrique intervient au moment où les ébauches d'inflorescences sont initiées, la fertilité et le rendement sont réduits (Guilpart *et al.*, 2014), bien que cet effet ne soit pas toujours observé (Chacón-Vozmediano *et al.*, 2020).

En présence d'une contrainte hydrique marquée qui se développe avant ou autour de la nouaison, avec un potentiel de base voisin de $-0,7$ MPa, le nombre de baies peut également être réduit (Wenter *et al.*, 2018). Les processus de multiplication cellulaire, très actifs au moment de la floraison et de la fécondation, sont en effet particulièrement sensibles au déficit hydrique (Lebon *et al.*, 2008). Un niveau trop faible des réserves carbonées suite à une augmentation de température peut également provoquer des avortements plus nombreux lors de la nouaison (Greer et Weston, 2010; Pagay et Collins, 2017). Puis, en fin de maturation, les déficits hydriques sévères entraînent un flétrissement des baies qui réduit encore leur volume (Deloire *et al.*, 2021).

Finalement, même si toutes les composantes du rendement sont affectées par la contrainte hydrique, c'est surtout la diminution de taille des baies qui explique la baisse de rendement dans de nombreux cas (fig. I-3-6B; Ojeda *et al.*, 2001; Triolo *et al.*, 2019). La perte de rendement est d'ailleurs plus forte lorsque la contrainte hydrique s'installe avant la véraison (Pellegrino *et al.*, 2014). En effet, la croissance des baies est moins sensible à la contrainte hydrique pendant la maturation. En outre, lorsque les années sèches s'enchaînent, les pertes de rendement s'aggravent (Chacón-Vozmediano *et al.*, 2020). De fortes variations sont également observées entre variétés (Mirás-Avalos et Intrigliolo, 2017).

La composition du raisin et ses métabolites primaires

La contrainte hydrique agit sur la photosynthèse, la croissance des rameaux et le grossissement de la baie. Une interprétation de l'équilibre entre ces trois effets permet d'expliquer l'effet plutôt complexe sur la richesse en métabolites primaires (sucres et acides organiques) du raisin.

Les sucres

La baisse de photosynthèse provoquée par la contrainte hydrique limitant la production de sucres, cela peut se répercuter sur la composition des baies. Si on suit la dynamique de l'accumulation de sucre dans les raisins, cet effet est facilement observable quand on exprime la quantité de sucre accumulée en milligramme/baie, ce qu'on appelle le chargement en sucre. Sur la figure I-3-6A, celui-ci est montré pour trois parcelles de Merlot et de Cabernet franc, situées sur des sols différents dans la région de Saint-Émilion, au cours de l'année 2005 — l'année la plus sèche jamais observée dans le Bordelais. Il est très fortement limité sur un sol de graves (faible réserve en eau) par rapport à un sol argileux (réserve en eau moyennement élevée) et à un sol sableux rédoxique (aucune limitation de l'alimentation en eau en raison d'une nappe d'eau à portée des racines). L'évolution du poids des baies est aussi très dépendante de la disponibilité en eau : les baies restent petites sur sol graveleux, elles sont de taille intermédiaire sur sol argileux et plus grosses sur sol sableux avec une nappe d'eau libre (fig. I-3-6B). Si on exprime l'accumulation de sucre dans la baie en concentration (g/L), l'effet de la contrainte hydrique sur le poids des baies compense presque entièrement celui sur le chargement en sucre, si bien que les teneurs en sucre restent étonnamment proches (fig. I-3-6C). On peut conclure à une très grande capacité de la vigne à réguler la teneur en sucres dans les raisins. On constate juste que les degrés potentiels sont un peu plus élevés sur un sol argileux à contrainte hydrique modérée, où le chargement en sucre était peu impacté par rapport à une alimentation en eau non limitante, mais avec un poids des baies déjà diminué.

En situation de très forte contrainte hydrique, la maturation peut être perturbée. Dans des cas extrêmes, on parle de « blocage de la maturation ». En réalité, ces situations sont assez rares et se limitent le plus souvent à des parcelles de jeunes vignes au système racinaire pas encore totalement développé. C'est plutôt en situation d'absence de contrainte hydrique que la maturation est ralentie et peut rester incomplète : pas à cause d'une limitation de la photosynthèse (qui est maximale dans cette situation), mais à cause d'une compétition entre maturation et croissance des rameaux et d'une taille des baies supérieure (Van Leeuwen *et al.*, 2022).

Les acides organiques

L'acidité totale des raisins produits par des vignes sous contrainte hydrique est plus faible à cause d'une moindre teneur en acide malique (Van Leeuwen *et al.*, 2009). Ramos *et al.* (2020) constatent également des acidités plus importantes dans les raisins du vignoble de la Rioja au cours d'années pluvieuses. Il peut s'agir d'un effet direct de la contrainte hydrique sur le métabolisme de l'acide malique, ou bien d'un effet indirect. En effet, les vignes sous contrainte hydrique sont souvent moins vigoureuses à cause d'un arrêt de croissance plus précoce, ce qui induit un microclimat plus chaud dans la zone des grappes, favorable à la dégradation de l'acide malique.

La composition du raisin et ses métabolites secondaires

L'augmentation de la qualité du vin produit à partir de vignes en situation de contrainte hydrique s'explique par une plus grande richesse des raisins en métabolites secondaires.

Les composés phénoliques

De nombreuses études attestent d'un effet positif de la contrainte hydrique sur la synthèse des composés phénoliques et en particulier des anthocyanes (Ojeda *et al.*, 2002 ;

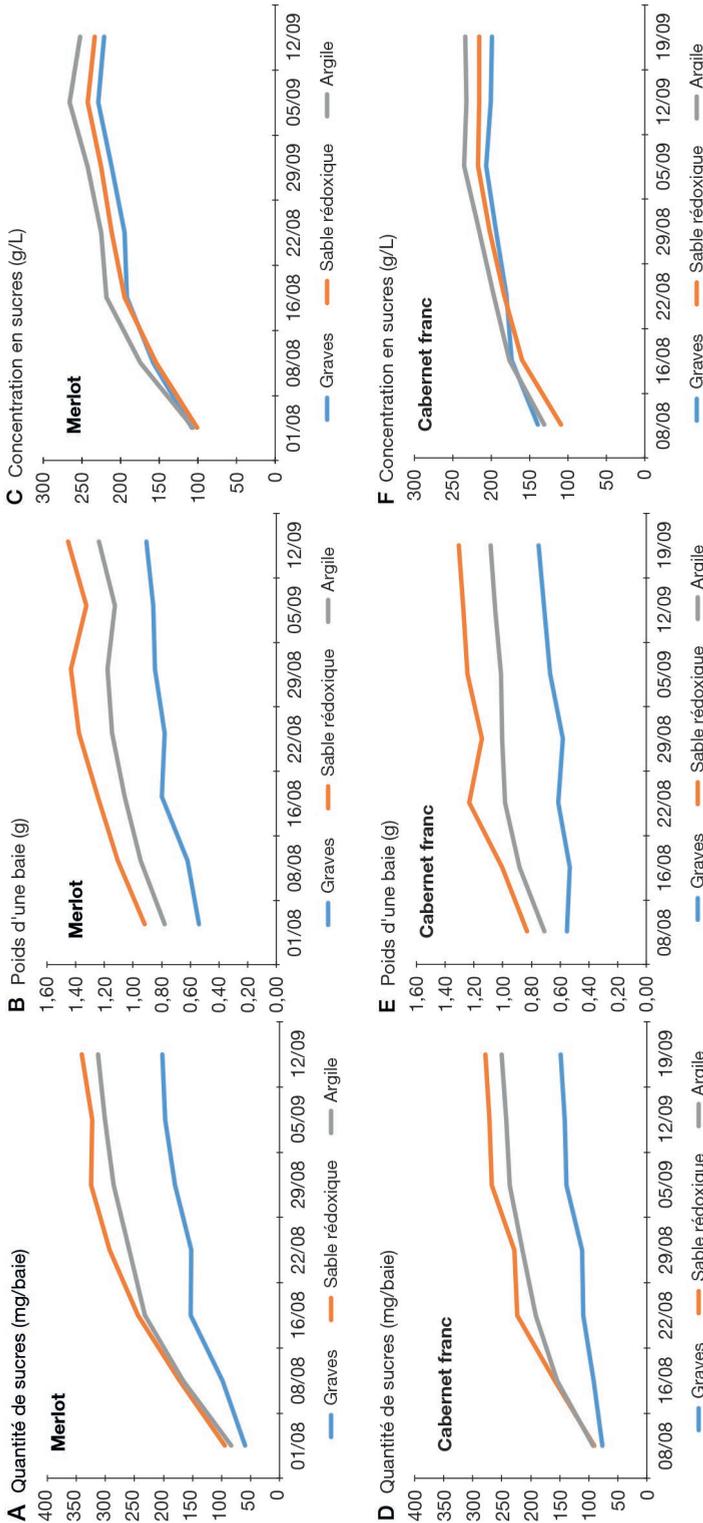


Figure 1-3-6. Dynamique de maturation sur trois parcelles avec des sols différents en 2005 à Saint-Émilion.

Graves : sol à très faible réserve en eau ; argile : sol avec réserve en eau intermédiaire ; sable rédoxique : nappe d'eau à portée des racines, sans contrainte hydrique. Chargement en sucre exprimé en milligramme/baie pour le Merlot (A) et le Cabernet franc (D) ; évolution du poids des baies (B et E) et accumulation en sucre exprimée en gramme/litre (C et F).

Van Leeuwen *et al.*, 2009). Castellarin *et al.* (2007) signalent une augmentation de la teneur en anthocyanes de 37 à 57 % dans les grappes de vignes conduites sous contrainte hydrique, par rapport à des témoins irrigués, et précisent les mécanismes de régulation génomiques qui permettent d'expliquer ces différences.

Les arômes

Le déficit hydrique est généralement favorable à l'expression des arômes dans les vins, car il réduit les arômes végétaux (en particulier la molécule de l'IBMP) et augmente les monoterpènes, les C13-norisoprénoïdes et les thiols volatils (à condition que le déficit soit modéré; tableau I-3-1). Cependant, il est également connu pour diminuer la teneur en rotundone et donc pour influencer la typicité liée à l'arôme poivré (Geffroy *et al.*, 2016). Lorsque la vigne subit un déficit hydrique pendant la période de maturation, les vins produits développent un bouquet de vieillissement plus attrayant (Picard *et al.*, 2017; Le Menn *et al.*, 2019). En revanche, un stress hydrique sévère favorise un vieillissement atypique lié au développement de l'aminoacétophénone (AAP) dans le Riesling (Hühn *et al.*, 1999) et peut provoquer l'apparition d'arômes de fruits cuits dans les vins rouges, probablement liée à un effet indirect du flétrissement des baies.

L'effet de la contrainte hydrique sur les métabolites secondaires est traité plus en détail au chapitre suivant.

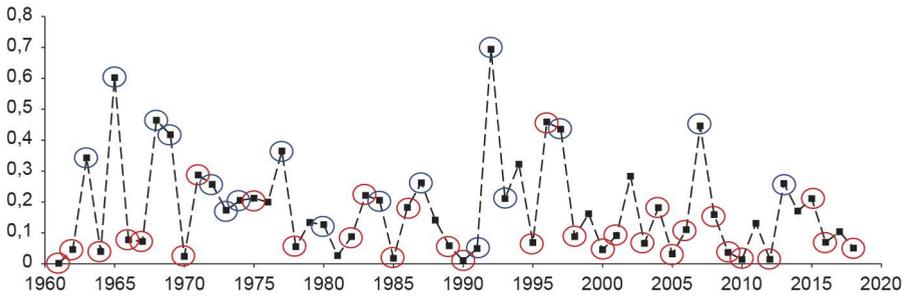
La qualité du vin

À cause de son effet positif sur les composés phénoliques et sur la plupart des familles aromatiques associées à la qualité du vin, la contrainte hydrique a un effet favorable sur la qualité du vin (en particulier du vin rouge). Il est possible de modéliser la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation par la réalisation d'un bilan hydrique. La sortie du modèle est la *Fraction of Transpirable Soil Water* (FTSW). Elle traduit l'état d'assèchement du sol : plus elle est faible, plus la vigne subit une contrainte hydrique forte. Il est frappant de constater que dans presque toutes les très bonnes années, la FTSW est faible pendant la période de maturation. C'est le cas à Bordeaux (fig. I-3-7A), mais, de manière plus surprenante, également à Châteauneuf-du-Pape (fig. I-3-7B).

Les effets du changement climatique sur les bioagresseurs de la vigne

La viticulture est confrontée à d'importants défis pour réduire l'utilisation des pesticides, tout en préservant le rendement et la qualité des baies dans un contexte de changement climatique. La lutte contre les maladies et les ravageurs est donc un aspect primordial à prendre en compte dans l'adaptation des vignobles dans cette nouvelle donne environnementale. Comme nous l'avons vu plus haut, l'évolution des dynamiques saisonnières de température et de précipitation affecte les rendements par le biais d'effets sur la physiologie et la phénologie de la vigne. Cela impacte indirectement les bioagresseurs, mais également la capacité de résistance de la vigne. La variabilité du climat influence aussi l'ampleur des épidémies par son effet direct sur les cycles de vie des agents pathogènes, leur taux de croissance et leur agressivité, entraînant une augmentation ou une diminution du développement des maladies dans les vignobles.

A FTSW moyen pendant les 30 jours avant les vendanges



B FTSW moyen pendant les 30 jours avant les vendanges

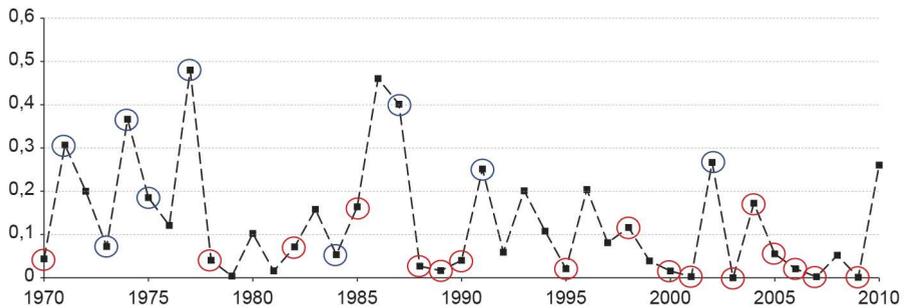


Figure I-3-7. Niveau de contrainte hydrique estimé par modélisation de la Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW) pendant les 30 derniers jours avant les vendanges pour une parcelle type avec une densité de 5000 cep/ha et une réserve totale (TTSW) de 200mm.

Plus la valeur du FTSW est faible, plus l'année est sèche. Les millésimes bons à très bons sont entourés en rouge et les années moyennes à mauvaises en bleu. (A) région de Bordeaux 1961-2018 (données climatiques stations INRAE-Villenave-d'Ornon et Météo-France-Mérignac) et (B) Châteauneuf-du-Pape 1970-2010 (données climatiques station INRAE-Avignon).

Une revue exhaustive de la littérature sur le sujet

L'impact de différentes variables climatiques sur les bioagresseurs de la vigne (agents pathogènes et ravageurs) a été caractérisé dans 155 articles scientifiques (synthèse bibliographique sur la période 1988-2020). Ces articles ont étudié 462 interactions individuelles entre la vigne, un paramètre climatique et un agent pathogène ou ravageur, à l'aide d'expérimentations et observations en laboratoire, en serre, au vignoble, ou d'approches de modélisation. Parmi les paramètres climatiques, la température est le plus étudié (47 % des interactions l'incluant), puis viennent les précipitations (17 %), l'humidité (14 %) et la sécheresse (8 %). Les agents pathogènes (66 % des interactions, principalement mildiou, oïdium et pathogènes du bois) sont plus étudiés que les ravageurs (20 % des interactions visant principalement eudémis, cicadelles et cochenilles).

Sur l'ensemble des interactions étudiées, 30 % présentaient un impact positif des paramètres climatiques sur les bioagresseurs de la vigne (et par conséquent plus de dégâts potentiels pour la vigne), tandis que 20 % mettaient en évidence un impact négatif (moins de dégâts potentiels). Par exemple, une augmentation des précipitations entraînerait une augmentation des dommages causés par le mildiou et une augmentation des

températures des effets négatifs sur la reproduction de l'eudémis. Néanmoins, 50% des interactions montraient un effet variable ou non significatif des paramètres climatiques sur les bioagresseurs, selon les conditions expérimentales, les années ou les traits de vie des organismes étudiés.

Cette synthèse quantitative de la littérature (Po, 2020) révèle un effort de recherche insuffisant sur l'impact du changement climatique sur les bioagresseurs de la vigne puisqu'un faible nombre d'études a directement traité cette question (155 en 30 ans). Dans ces articles, la grande diversité des conditions expérimentales, des traits de vie étudiés et des paramètres climatiques testés ne permet pas d'obtenir des prédictions précises de l'évolution conjointe des dommages globaux causés à la vigne et du climat. Il sera pourtant essentiel de prendre en compte les décalages phénologiques entre la vigne et ses bioagresseurs ainsi que les interactions souvent complexes entre la réponse physiologique de la vigne et celle de ses bioagresseurs à l'environnement. La bonne compréhension des enjeux sur la réponse des bioagresseurs de la vigne au changement climatique passera par là (Caffarra *et al.*, 2012).

En miroir des développements précédents sur les effets de l'augmentation de la température et de la contrainte hydrique sur la vigne, nous présentons en suivant l'impact de ces variations sur les interactions entre la vigne et ses bioagresseurs.

Effet de la température

Les effets des variations de température sur les bioagresseurs de la vigne dépendront de la température optimale des différentes phases de leur cycle de vie, en particulier des phases de propagation ou d'infection (Togashi, 1949; Bebber *et al.*, 2021). Une élévation des températures entraînerait théoriquement, dans un premier temps, une augmentation du nombre d'espèces fongiques pathogènes présentes dans l'hémisphère nord (Chalonner *et al.*, 2021), puisque des conditions plus chaudes seront plus favorables au développement de nombreuses espèces fongiques et oomycètes. Toutefois, si les températures optimales sont dépassées, un effet négatif sur les agents pathogènes et les ravageurs est alors attendu. Plusieurs espèces fongiques pathogènes du bois de la vigne ont, par exemple, des gammes de températures optimales plus ou moins larges, avec des températures maximales de croissance mycélienne allant de 30 à 40°C, suggérant des réponses différentes au réchauffement climatique (Songy *et al.*, 2019). Ainsi, l'augmentation de la température impacte fortement la biologie, la phénologie et l'aire de répartition des ravageurs de la vigne et de leurs ennemis naturels (Stavrínides et Mills, 2011; Reineke et Thiéry, 2016).

Effet du déficit hydrique

La sécheresse peut impacter directement, ou indirectement *via* le statut physiologique de la vigne, les bioagresseurs présents dans les vignobles. Ces impacts dépendront également de l'écologie des agents pathogènes, qui ne répondront pas de la même manière au stress hydrique selon qu'ils soient biotrophes, nécrotrophes ou vasculaires (Oliva *et al.*, 2014). Par exemple, l'efficacité d'infection d'agents pathogènes biotrophes ou nécrotrophes, tels que les agents causaux de l'oïdium et de la pourriture grise, serait réduite lorsque le potentiel hydrique et la conductance stomatique de la vigne baissent avec un stress hydrique (Guilpart *et al.*, 2017). À l'opposé, il a été

mis en évidence que la sécheresse pourrait augmenter les dommages causés par le phylloxera (Savi *et al.*, 2019) et par la maladie de Pierce (Costello *et al.*, 2017; DelCid *et al.*, 2018). Des agents pathogènes du bois (*Botryosphaeriaceae*) inoculés sur des boutures racinées provoquent aussi de plus grandes nécroses en condition de stress hydrique (Van Niekerk *et al.*, 2011; Galarneau *et al.*, 2019). Cependant, en condition d'infection naturelle, il a été également montré que la sécheresse inhibe le développement des symptômes foliaires associés à la maladie de l'esca (Bortolami *et al.*, 2021). Les pathologies vasculaires et la sécheresse impactant toutes deux le transport de l'eau dans la plante, de fortes interactions, synergétiques ou antagonistes, sont attendues entre ces deux types de stress selon leur moment d'apparition et leur intensité (Oliva *et al.*, 2014; McDowell *et al.*, 2008).

Cette synthèse de la littérature révèle qu'il existe globalement assez peu d'études expérimentales sur l'interaction entre les agents biotiques de la vigne et le stress hydrique (en particulier pour les deux maladies concentrant la majorité des traitements phytosanitaires, l'oïdium et le mildiou). De plus, trop peu d'études quantifient réellement le statut physiologique de la vigne au cours des expérimentations par une mesure de potentiel hydrique de base ou d'échanges gazeux, ce qui est pourtant indispensable pour étudier les interactions vigne-bioagresseurs dans un contexte de changement climatique.

Encadré I-3-2. Vignobles et incendies

La combinaison des effets des températures élevées et de la sécheresse augmente les risques d'incendie. Les rapports successifs du Giec alertent sur le fait que ce danger grandit avec chaque incrément de température (IPCC, 2021). Ces dernières décennies, de grands incendies se sont multipliés à l'échelle planétaire. Situées en zones sensibles, de nombreuses régions viticoles à travers le monde, comme en Australie, au Chili, en Californie et en France, ont dû faire face à ce fléau.

Il a cependant été observé que les vignobles pouvaient ralentir la progression des incendies et servir de coupe-feu (Ascoli *et al.*, 2021; Thatch, 2018). Par exemple, lors des récents incendies qui ont touché les vignobles des Pyrénées-Orientales, les vignes en production ont été peu touchées, même si les systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte ont été détruits. Par contre, les friches viticoles et certaines parcelles peu entretenues ont joué un rôle inverse, avec la présence de buissons et d'herbes sèches facilement inflammables.

Dans les parcelles ayant subi le feu, les vignes peuvent être plus ou moins endommagées. Les plus affectées peuvent alors présenter une croissance, une teneur en amidon dans les bois et une fertilité des bourgeons réduites l'année qui suit l'incendie. La récupération se fait en un ou deux cycles, notamment dans les vignobles irrigués (Collins *et al.*, 2022). Le risque le plus important est celui des «goûts de fumée» qui déprécient parfois le potentiel qualitatif des vins élaborés avec des raisins exposés aux fumées des incendies (Krstic *et al.*, 2015). Ces mauvais goûts sont dus à des phénols volatils qui sont produits pendant la combustion de la biomasse et se déposent sur les raisins, mais aussi par les raisins eux-mêmes, qui métabolisent les phénols volatils via les voies de l'acide shikimique et des phénylpropanoïdes. Les raisins verts sont particulièrement exposés à ce second processus, car les phénols volatils sont rapidement dégradés, mais leurs métabolites glycosylés sont stockés dans les baies à plus long terme (Jiang *et al.*, 2021).

Conclusion

Le climat exerce un très fort effet sur la phénologie, la physiologie et l'environnement biotique de la vigne. Les paramètres climatiques dont l'impact est le plus grand sont la température et les facteurs qui influencent son état hydrique (précipitations et évaporation potentielle ou ET_0). Tout comme la température et le niveau de contrainte hydrique sont modifiés sous l'effet du changement climatique, le comportement de la vigne a été fortement modifié au cours des dernières décennies et continuera à l'être. Parmi les modifications les plus spectaculaires, on peut signaler une avancée de la phénologie de la vigne de plusieurs semaines, une augmentation de la teneur en sucres du raisin (et donc de la teneur en alcool dans les vins), ainsi qu'une modification des teneurs en métabolites secondaires. Ces tendances moyennes ne remettent pas immédiatement en cause le maintien des vignobles dans les aires de production actuelles. En effet, des mesures adaptatives permettent de corriger les effets moyens du changement climatique, car l'espèce est globalement bien armée pour les supporter. Cependant, au-delà des tendances moyennes, c'est plutôt la multiplication et l'intensification des épisodes de sécheresse combinés à des pics de chaleur extrême qui sont préoccupantes. Outre l'augmentation des risques d'incendie (encadré I-3-2), ces conditions peuvent avoir des effets irréversibles et cumulatifs mal connus, susceptibles de menacer la pérennité de la vigne.

LES IMPACTS SUR LA QUALITÉ DU VIN

Cécile Thibon, Aurélie Roland, Philippe Darriet, Pierre-Louis Teissèdre, Michael Jourdes et Alexandre Pons

Introduction

La composante aromatique variétale des vins repose sur une grande diversité de composés volatils odorants dont la distribution est intimement liée à la perception de tonalités spécifiques à un cépage, elles-mêmes en lien avec le terroir dont il est issu. Cette composante variétale découle évidemment de la composition du raisin au moment de la récolte. Ce dernier renferme à la fois des composés odorants volatils et surtout un large ensemble de précurseurs d'arômes, qui sont libérés lors des processus de vinification et d'élevage, par des voies chimiques, biochimiques ou microbiennes. Ces composés volatils sont souvent retrouvés à l'état de traces, c'est-à-dire de l'ordre du microgramme par litre voire, pour certains, à celui d'ultra-traces, proches du nanogramme par litre de vin. Malgré tout, au regard de leur pouvoir odorant, certains composés sont en capacité de contribuer à l'odeur particulière qu'un vin peut développer dans sa jeunesse ou encore au cours de son vieillissement en bouteille²⁵.

L'impact d'une modification du climat à l'échelle locale sur la qualité des vins blancs et rouges nous amène à aborder la notion de maturité du fruit. Ce paramètre conditionne la composition du vin et indirectement son équilibre organoleptique et sa stabilité dans le temps.

La maturation du raisin est un processus dynamique initié à la véraison et se poursuivant jusqu'à la récolte, au cours duquel la composition des baies change considérablement, tant en ce qui concerne les métabolites primaires (sucres, acides organiques) que secondaires (composés phénoliques, précurseurs d'arômes et arômes, mais également composés antioxydants ou abondance relative des réactifs oxygénés).

Le choix de la date de récolte, et donc la détermination de la maturité optimale, constitue un des fondements de la qualité de la vendange et du vin qui en résulte. Comme le remarquaient très justement J. Ribéreau-Gayon et E. Peynaud dans le *Traité d'œnologie*, « il est très difficile d'adopter une définition rigoureuse de l'état de maturité du raisin. Tout le monde a la notion du raisin mûr, mais la maturité n'est pas un caractère absolu... Il n'y a pas un état physiologique limite, définitif, facile à définir, mais il y a des degrés dans la maturité ». Ainsi, la maturité d'un raisin sera différente d'une année à l'autre, selon la réponse des cépages mais aussi des terroirs vis-à-vis des contraintes climatiques

25. Cette propriété particulière des composés odorants se nomme seuil de détection, c'est-à-dire la concentration à partir de laquelle un collège de dégustateurs est capable de différencier un verre contenant le composé d'un autre où il est absent.

imposées par le millésime, telles que la température, le statut hydrique et l'intensité du rayonnement solaire. Au final, le chef de culture motive ses choix par la connaissance de facteurs sanitaires, climatiques, et, finalement, esthétiques, qui lui permettent d'apprécier la qualité de sa vendange.

L'impact du changement climatique sur l'arôme des vins

Une partie de la composante aromatique des vins s'explique par la présence de composés volatils qui peuvent être classés selon leur famille chimique, leur origine (métabolisme du raisin, phénomènes biochimiques préfermentaires, métabolisme fermentaire, réactions postfermentaires) ou encore leur contribution olfactive (Ribéreau-Gayon *et al.*, 2017a; Van Leeuwen *et al.*, 2022).

Certains de ces composés volatils sont présents dans le raisin et sont directement cédés au vin sans transformation. C'est le cas des méthoxy-pyrazines conférant des notes végétales au vin (Allen *et al.*, 1991), de la (-)-rotundone aux nuances poivrées (Wood *et al.*, 2008) ou encore de certains terpènes (Ribéreau-Gayon *et al.*, 2017b). Dans la grande majorité des cas, les composés volatils sont présents dans le raisin sous forme de précurseurs non volatils et non odorants, tels que les formes glycosylées (terpènes, dérivés des C13-norisoprénoides), les formes S-conjuguées pour les précurseurs de thiols variétaux ou les dérivés lipidiques complexes pour les lactones. C'est au cours des étapes de vinification et d'élevage que les composés volatils correspondants seront libérés dans le vin sous l'action de mécanismes biochimiques ou chimiques.

À l'exception de certains composés, telles les méthoxy-pyrazines dont les teneurs diminuent dans le raisin jusqu'à maturité, le potentiel aromatique, retrouvé sous forme de précurseurs inodores dans la baie de raisin, est quant à lui accru au cours de la phase de maturation du raisin selon des cinétiques qui sont propres à ces précurseurs. Ces dynamiques d'accumulation peuvent être directement impactées par les conditions écophysiologiques de la vigne. Des connaissances complémentaires, mais encore fragmentaires, ont été apportées par la caractérisation des gènes et l'étude de leur expression en relation avec l'accumulation dans le raisin des monoterpènes, des alkylméthoxy-pyrazines ou des lactones, par exemple (Duchêne *et al.*, 2009; Sasaki *et al.*, 2016).

Les conséquences organoleptiques de la date de récolte sur la constitution de la baie de raisin sont multiples et s'expriment, entre autres, par une modulation du caractère végétal et de l'arôme fruité. Ces tonalités sont particulièrement contrastées dans des cépages tels que le Merlot ou le Cabernet-Sauvignon, selon les conditions de viticulture et de maturation. Récoltés précocement, les raisins rouges et les vins issus de leurs vinifications sont marqués par des odeurs végétales évoquant le lierre. À maturité, ces vins présentent alors un mélange complexe d'odeurs rappelant le cassis, la mûre ou encore la fraise. À l'inverse, cueillis tardivement en état de surmaturation, les raisins de Merlot et, dans une moindre mesure, ceux de Cabernet-Sauvignon, ainsi que les vins issus de leurs vinifications, rappellent systématiquement les fruits séchés, comme le pruneau, la figue, odeurs caractéristiques des vins « oxydatifs ».

Le plus souvent, les cépages à saveurs dites « simples », c'est-à-dire peu odorants lorsqu'ils sont récoltés à maturité, développent — et ce quelle que soit la variété — des tonalités de fruits cuits dès lors qu'ils sont récoltés tardivement, en état de surmaturité voire flétris. Là encore, la définition d'un point de vue physiologique de la surmaturité est délicate tant elle dépend du cépage. Toutefois, de récents travaux ont permis l'identification de molécules odorantes en lien avec ces tonalités aromatiques, parmi lesquelles on retrouve le furanéol et l'homofuranéol à l'odeur de caramel et de fraise surmûrie, la γ -nonalactone rappelant la noix de coco et la pêche surmûrie, la 3-méthyl-2,4-nonanedione (MND) à l'odeur de noyau de pruneau, la massoia lactone et la 1,5-octadien-3-one évoquant la figue sèche. Tous ces composés sont impliqués directement ou indirectement dans l'arôme de fruits cuits des raisins surmûris et des vins rouges issus de leur vinification (Allamy *et al.*, 2018). Leur dosage permet de juger de l'apparition précoce de cette évolution aromatique des raisins, en lien avec une modification de la physiologie du fruit en période de stress, que celui-ci soit thermique, hydrique ou induit par les rayonnements. À titre d'exemple, le suivi de la MND dans les raisins de Merlot, cépage assez sensible à la surmaturation ainsi qu'au flétrissement, montre qu'une teneur en MND supérieure à 100 ng/L dans les moûts correspond à un niveau de maturité des raisins très avancé dont l'odeur rappelle les fruits cuits. Lorsque les baies flétrissent, une autre famille de composés voit ses teneurs augmenter de façon très importante : les lactones (γ -nonalactone, massoia lactone). La figure I-4-1 illustre par exemple l'impact du millésime sur la teneur en γ -nonalactone des vins. Le millésime 2003, très chaud durant la période estivale, avait provoqué le flétrissement de nombreuses baies de Merlot modifiant durablement la composition du vin.

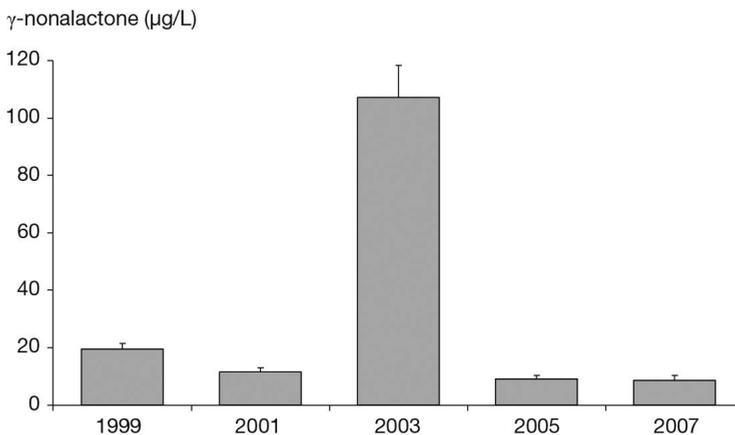


Figure I-4-1. Teneurs moyennes en γ -nonalactone retrouvées dans les vins issus de différents millésimes d'un même cru de Lalande-de-Pomerol (analyses effectuées en 2010, n = 2).

Effet de la température et du rayonnement

Si l'on conçoit aisément que l'augmentation de la température peut impacter la physiologie et le métabolisme de la plante (respiration, évapotranspiration...), une modification du rayonnement peut avoir également un impact fort. En effet, la présence de lumière sur la baie agit comme source de chaleur. Elle initie aussi de nombreuses réactions photochimiques pouvant induire des stress oxydatifs qui impactent l'équilibre redox de la baie, ainsi que son métabolisme primaire et secondaire. En cas de modification forte

de la température et du rayonnement au cours de la phase de maturation des baies, des dégâts plus ou moins importants peuvent être observés. L'incidence et la gravité dépendent d'une interaction complexe de ces facteurs ainsi que de l'état biochimique, physiologique et morphologique de la baie, qui dépendent tous du stade phénologique et de la variété. Les symptômes vont de l'apparition de taches sur la pellicule jusqu'à la nécrose totale de la baie avec dessiccation. On parle alors d'échaudage ou coup de soleil. Dans ces cas extrêmes, le rendement et la qualité du vin obtenu à partir de ces baies seront fortement impactés.

Au cours des dernières décennies, de nombreux auteurs ont cherché à caractériser l'impact de la température et du rayonnement sur la composante organoleptique des vins (Bonada et Sadras, 2015; Cataldo *et al.*, 2021; Drappier *et al.*, 2019; Pons *et al.*, 2017). Par exemple, les teneurs en 3-alkyl-2-méthoxy-pyrazines aux nuances végétales sont fortement abaissées lors d'une augmentation de la température et du rayonnement au cours du développement des raisins de la famille Carmenet (Cabernet franc, Cabernet-Sauvignon, Carménère...) (Allen *et al.*, 1991; Falcão *et al.*, 2007). Concernant les dérivés des C13-norisoprénoides, les teneurs en TDN (1,1,6-triméthyl-1,2-dihydro-naphtalène) évoquant des notes de kérosène dans les vins de Riesling sont fortement accrues lors d'une défoliation (élimination des premières feuilles au stade véraison) qui engendre une plus forte exposition des raisins à la lumière (Schüttler *et al.*, 2015). D'autres auteurs confirment cette tendance pour les teneurs finales en terpènes et leurs formes glycosylées (dont le linalol, le citronellol, le nérol et le géraniol) et en norisoprénoides en C13 (TDN, 3-oxo- α -ionol, β -ionone et β -damascénone); tandis qu'une augmentation du rayonnement UV semble avoir un impact négatif sur la quantité d'esters éthyliques d'acides gras dans le vin de pinot noir (Friedel *et al.*, 2016; Sasaki *et al.*, 2016).

D'autres auteurs ont cherché à déterminer l'impact d'une élévation modérée de la température (environ +1,5°C) sur la composante organoleptique des vins. Un dispositif permettant de modifier la température uniquement sur la zone des grappes de la nouaison à la récolte (Sadras et Soar, 2009) a été installé sur une parcelle expérimentale de Cabernet-Sauvignon et de Sauvignon blanc, dans la région bordelaise. L'analyse sensorielle des vins blancs et rouges issus de cet essai n'a pas permis de mettre en évidence de différence significative entre les deux modalités. Une attention particulière a été portée sur des marqueurs variétaux de ces cépages : les thiols volatils conférant des notes fruitées au vin. Si aucune différence significative n'a été observée dans les concentrations du 3-sulfanylhexanol (3SH), la teneur en 4-méthyl-4-sulfanyl-pentan-2-one (4MSP, aux nuances de buis) (Darriet *et al.*, 1995) était significativement plus faible dans les vins issus de la modalité chauffée (Darriet *et al.*, 2019). En revanche, dans le raisin, les cinétiques d'accumulation de leurs précurseurs non volatils de type S-conjugués (Peyrot Des Gachons *et al.*, 2002; Roland *et al.*, 2011) sont plus fortement impactées. À la récolte, les baies issues de la modalité chauffée présentent des teneurs en S-conjugué au glutathion sous forme aldéhydique du 3SH (Glut-3SH-Al; Thibon *et al.*, 2016) jusqu'à 70% plus faibles que la modalité témoin (Wu *et al.*, 2019a).

Pour ce qui est de l'impact de ces facteurs abiotiques sur le niveau de maturité des raisins rouges, de récents travaux ont pu préciser, en se plaçant en conditions contrôlées, l'impact de la lumière sur les marqueurs des tonalités de fruits cuits. Il semble que l'ensoleillement favorise la formation des lactones et des aldéhydes dans les raisins, probablement par des mécanismes radicalaires (Allamy *et al.*, 2018).

Effet du statut hydrique

Le changement climatique a un impact significatif sur les cycles pluviométriques. Ainsi, si chaque année la fréquence des périodes de sécheresse s'intensifie, elles vont présenter une préoccupation majeure pour l'avenir de la viticulture, en particulier dans le sud-est de la France. Dans un contexte de déficit hydrique, la modification du métabolisme de la vigne et du profil aromatique des vins devient d'autant plus problématique que la modification de ce profil s'accompagne d'une diminution importante des rendements (Van Leeuwen *et al.*, 2009; Zufferey *et al.*, 2017). Ainsi, comprendre les conséquences d'un déficit hydrique ou d'une modification du statut hydrique sur la qualité des raisins est nécessaire pour maintenir un standard de qualité des vins.

De premiers travaux menés sur Sauvignon blanc ont démontré un effet bénéfique d'un régime hydrique modéré sur les teneurs en précurseurs de thiols. À l'inverse, des déficits hydriques sévères affectant la maturation des raisins conduisent à une baisse des taux de précurseurs de thiols dans le raisin (Cataldo *et al.*, 2021; Peyrot Des Gachons *et al.*, 2005) et de thiols volatils dans les vins (Schüttler *et al.*, 2013). Au niveau physiologique, il a également été démontré que le déficit hydrique léger induisait une augmentation des teneurs en précurseurs glutathionylé et cystéinylé du 3SH dans les feuilles de Koshu, Chardonnay et Merlot (Kobayashi *et al.*, 2011). Cependant, il semblerait que la réponse au déficit hydrique soit dépendante du cépage et de la région considérée. Dans le Valais (Suisse), la teneur en précurseur cystéinylé du 3SH ne semble pas être affectée par le statut hydrique du cépage Petit Arvine, quel que soit le millésime considéré (Zufferey *et al.*, 2020).

Récemment plusieurs travaux ont proposé de caractériser l'accumulation des métabolites et autres solutés en objectivant précisément le stade de développement des raisins (Alem *et al.*, 2021; Bigard *et al.*, 2018) et en caractérisant l'état physiologique des ceps (Wilhelm De Almeida *et al.*, 2023). Au cours du millésime 2021, la teneur en précurseurs de thiols à ce stade-ci a pu être mise en regard de différents niveaux de contraintes hydriques, de stress modéré (-0,4 à -0,6 MPa), fort (-0,6 à -0,8 MPa) à sévère (-0,8 à -1,2 MPa).

La source principale de variation des teneurs en précurseurs de thiols reste le génotype. Lorsque les teneurs sont exprimées en concentration moyenne, aucun effet significatif du stress hydrique n'a pu être observé sur le panel de génotypes étudiés. En revanche, l'évaluation quantitative par baie (nmol/baie) fait apparaître une diminution significative des teneurs en précurseurs de thiols en situation de contrainte hydrique (fig. I-4-2). Ce résultat montre qu'en pénurie d'eau la vigne limite à la fois l'importation d'eau et l'accumulation de précurseurs de thiols dans les mêmes proportions. Il est intéressant de noter que les génotypes les plus riches en précurseurs de thiols sont les plus affectés par la contrainte hydrique dans les conditions expérimentales étudiées.

Étonnamment, en considérant d'autres familles de composés comme les monoterpènes, un déficit hydrique sévère peut conduire à une formation accrue des composés volatils dans les vins de Riesling (Schüttler *et al.*, 2013). D'autres publications ont confirmé l'évolution différentielle des composés aromatiques variétaux en fonction du statut hydrique de la vigne par la mesure de la discrimination isotopique du carbone (valeurs $\delta_{13}\text{C}$) des moûts à maturité (Van Leeuwen *et al.*, 2010). Ainsi, la (-)-rotundone est détectée à une teneur plus élevée dans les vins issus de raisins ayant fait face à un déficit hydrique plus

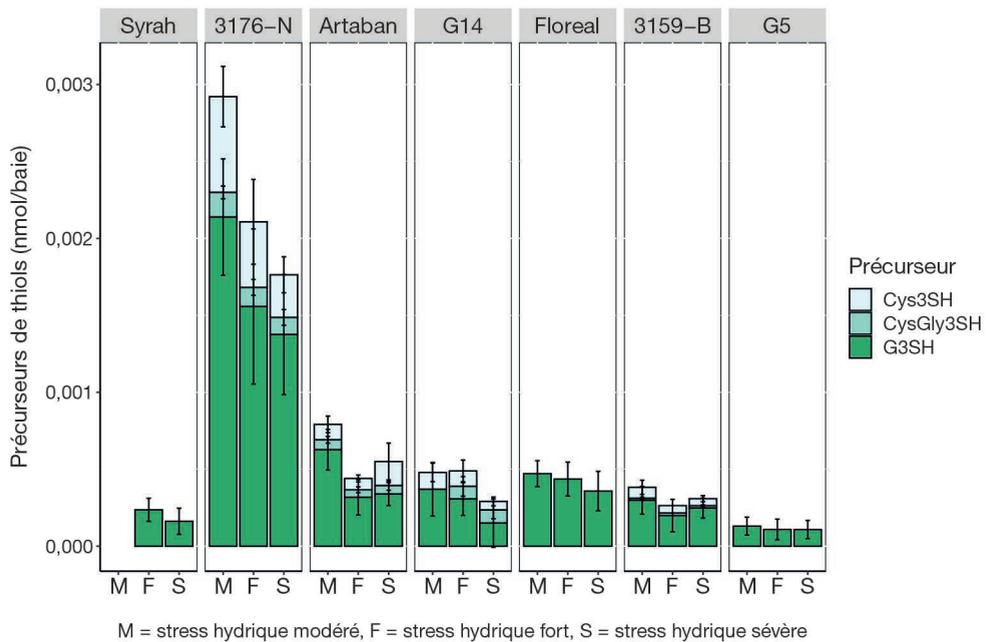


Figure I-4-2. Effet du stress hydrique sur les précurseurs de thiols pour différents génotypes. Les teneurs sont exprimées en nmol/baie pour un stade physiologique précis (arrêt de chargement phloèmien). Source : Wilhelm De Almeida et al., 2023.

faible (c'est-à-dire des moûts ayant des valeurs $\delta_{13}\text{C}$ plus élevées). De même, pour les vins de Muscat, Giordano et al. (2013) rapportent des teneurs en linalol libre et en géraniol plus élevées (+70%) dans les plantes irriguées qu'en régime de sécheresse. À l'inverse, De Royer Dupré et al. (2014) ont observé un potentiel accru en diméthyle sulfure (DMS, renforçant les notes fruitées dans les vins rouges) dans des raisins de Grenache présentant des valeurs de $\delta_{13}\text{C}$ plus faibles (déficit hydrique plus élevé). Enfin, par extrapolation, la discrimination isotopique du carbone de l'éthanol a permis de corréliser la perception d'un bouquet qualitatif de vieillissement des grands vins de Bordeaux à un déficit hydrique plus important (Picard et al., 2017).

Ainsi, les effets cumulés de la température et d'un statut hydrique plus contraignant dans le contexte du changement climatique seront vraisemblablement à l'origine d'une modification du métabolisme primaire et secondaire du raisin avec des risques d'échaudage, de brûlure/dessiccation des baies, voire possiblement d'arrêt de la maturation. De même, il est à envisager qu'une augmentation des températures nocturnes puisse amplifier les effets du déficit hydrique sur la biosynthèse des composés volatils et des formes précurseurs dans le raisin. Bon nombre de ces résultats ont été obtenus par le prisme du cépage sans tenir compte du porte-greffe. Or, la réponse d'un même cépage à des conditions climatiques contraignantes au niveau hydrique et thermique peut bien entendu donner des résultats contrastés en fonction du porte-greffe. En effet, ce dernier affectant de manière significative la croissance végétative, le rendement et la phénologie, il est évident que la qualité des baies peut être affectée. Berdeja et al. (2014) et Treeby et al. (1998) ont mis en évidence, par exemple, un impact significatif du porte-

greffe sur la teneur en acides aminés des raisins à la récolte. De même, les résultats de travaux menés en Australie sur l'IBMP confirment l'impact du porte-greffe (140 Ruggeri par rapport à Börner) sur sa teneur dans les raisins de Syrah (Sanders *et al.*, 2023).

L'impact du changement climatique sur la composante phénolique des vins

Outre les sucres, les acides organiques et les composés odorants, les conditions environnementales et notamment l'augmentation des températures modifient également l'accumulation des composés phénoliques (anthocyanes et tannins), qui ont un rôle très important dans la qualité et la typicité des vins rouges. Bien que ces composés soient présents en plus faible quantité dans les vins blancs, ils participent néanmoins à la qualité et à la stabilité de ces vins. Cette grande famille de molécules provient du métabolisme secondaire des végétaux et contribue à la qualité et la typicité des vins rouges à travers leurs propriétés sensorielles, comme la couleur, l'astringence, l'amertume, mais également par leurs combinaisons lors du vieillissement du vin (Mcrae *et al.*, 2013; Teissèdre et Jourdes, 2013). Les anthocyanes sont les pigments rouges localisés dans la pellicule du raisin et exceptionnellement dans la pulpe. Elles font partie de la famille des flavonoïdes et se différencient entre elles par leur degré d'hydroxylation au niveau du cycle B, leur taux de méthylation et le groupement estérifié sur le sucre. La couleur des vins rouges, première caractéristique que les consommateurs jugent, dépend donc de l'accumulation de ces composés lors de la maturation des raisins, de leurs extractions au cours de la vinification, mais aussi de la proportion des anthocyanes extraites ainsi que de leur évolution au cours du vieillissement des vins, grâce aux interactions qu'elles produisent avec les tannins condensés et les autres composés des vins rouges (Ribéreau-Gayon *et al.*, 2017a).

Les tannins condensés sont des polymères d'unités flavanols qui se différencient entre eux par leurs centres asymétriques et le nombre de substituants galloylés estérifiés en position C3. Les unités flavanols majoritaires sont : la catéchine, l'épicatéchine, la gallo-catéchine, l'épigalocatéchine et l'épicatéchine-3-O-gallate. Ces unités monomériques sont liées entre elles par des liaisons carbone-carbone interflavanes de type B en C4→C8 ou C4→C6 (Teissèdre et Jourdes, 2013). Les tannins condensés de la pellicule diffèrent de ceux des pépins principalement par la présence de prodelfinidines, mais aussi par leur degré moyen de polymérisation (DPM) plus élevé, ainsi que par la présence de quantités plus faibles de dérivés galloylés (Chira *et al.*, 2009; Prieur *et al.*, 1994). Au niveau organoleptique, une corrélation positive a été observée entre le DPM, le pourcentage de galloylation (%G) et l'astringence des vins (Chira *et al.*, 2009), alors que les monomères sont décrits comme influençant l'amertume. Bien que les flavanols, les tannins condensés et les anthocyanes dérivent de la voie de biosynthèse des flavonoïdes, il existe des différences dans leur régulation et ils sont donc impactés différemment par les conditions environnementales.

Effet de la température et du rayonnement

De nombreuses études ont traité de l'effet de la température et de la luminosité sur les composés phénoliques (Cohen *et al.*, 2008), mais l'interprétation des résultats reste

limitée par les paramètres expérimentaux et les artefacts, et n'est donc pas nécessairement comparable à l'évaluation directe sur le terrain. Il a été montré que l'augmentation de la température, que ce soit par chauffage direct, par rayonnement incident ou par augmentation de la température de l'air, accroît le métabolisme de la plante et donc l'accumulation des métabolites associés (Downey *et al.*, 2006). Cependant, à des températures élevées, de nombreux processus métaboliques sont réduits ou s'arrêtent. Chez la vigne, pour l'accumulation des composés phénoliques, il est communément admis que cette température est d'environ 30-35°C (Coombe, 1987). De nombreuses études menées depuis la véraison jusqu'à la récolte ont montré que ces températures induisent une diminution de la concentration en anthocyanes dans les baies de raisins (Drappier *et al.*, 2019; Tarara *et al.*, 2008).

Une étude comparant la cinétique d'accumulation d'anthocyanes dans les baies de Merlot au vignoble entre le côté est (recevant le soleil le matin) et le côté ouest (exposé au soleil de l'après-midi et donc plus chaud) des rangs a montré que les baies de raisin du côté est présentaient des niveaux d'anthocyanes plus élevés (Spayd *et al.*, 2002), en accord avec les observations de Bergqvist *et al.* sur des raisins de Cabernet-Sauvignon et de Grenache (Bergqvist *et al.*, 2001). De plus, dans le but de séparer les effets de la lumière et de la température, Spayd *et al.* (2022) ont artificiellement refroidi les baies exposées côté ouest et chauffé les fruits les moins exposés côté est. Le refroidissement des fruits exposés du côté ouest a conduit à une augmentation de la teneur en anthocyanes, alors que le chauffage a entraîné une réduction de cette teneur. Ces résultats démontrent que l'accumulation d'anthocyanes est davantage influencée par la température que par la luminosité. Ils ont été confirmés sur des raisins de Syrah en utilisant une boîte étanche à la lumière qui ne modifie pas les autres paramètres microclimatiques, tels que la température et l'humidité (Downey *et al.*, 2006). En plus de la diminution de la concentration en anthocyanes, la proportion d'anthocyanes trihydroxylées (delphinidine, pétunidine et malvidine) et celle d'anthocyanes *p*-coumaroylglucosides sont plus élevées que dans la modalité témoin (Haselgrove *et al.*, 2000).

De nombreuses études se sont également intéressées à l'impact d'une augmentation de la température et du rayonnement sur l'accumulation et la composition des tannins condensés dans les pépins et les pellicules. Ces études montrent qu'une augmentation modérée de la température de la zone des grappes (de +1 à +3°C), de la nouaison à la récolte, n'influence pas la teneur en tannins condensés des pépins et des pellicules du raisin à la récolte (Carbonell-Bejerano *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2019b). Cependant, l'étude de la teneur et de la composition en tannins condensés tout au long du développement des baies, pour des différences de température ou de rayonnement (fruits ombragés et fruits exposés), montre des concentrations significativement plus élevées dans les baies pour les conditions de températures élevées ou de rayonnement important à la véraison ou à mi-véraison (Cohen *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2019a). L'évolution classique des tannins condensés dans la baie est la formation d'un pic d'accumulation se produisant au moment de la véraison et diminuant ensuite jusqu'à la récolte. Cette diminution est généralement admise comme étant une diminution de l'extractibilité des tannins (Amrani Joutei *et al.*, 1994; Downey *et al.*, 2003). Cette diminution d'extractibilité observée quelles que soient les conditions s'est avérée plus importante pour les baies ayant été soumises à des températures ou rayonnements plus élevés, qui induisent des concentrations proches à la récolte (Cohen *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2019a).

Effet du statut hydrique

Un déficit hydrique au cours de la phase de croissance de la baie de raisin, lors de la synthèse des composés phénoliques (anthocyanes et tannins), induit généralement une concentration plus élevée de ces composés. Ce phénomène est imputé d'abord à la réduction du volume des baies, qui modifie la proportion des pépins et des pellicules par rapport à la pulpe et donc les équilibres lors des étapes de macération et d'extraction de la vinification (Castellarin *et al.*, 2007). Cette accumulation est aussi liée à une augmentation de l'activité enzymatique de la voie de biosynthèse des flavonoïdes. Outre une augmentation globale des composés phénoliques, plusieurs études montrent également un impact sur la composition, avec notamment une proportion plus importante d'anthocyanes trihydroxylés (delphinidine, pétunidine, malvidine), mais également une augmentation du degré de polymérisation des tannins dans les pellicules (Cáceres-Mella *et al.*, 2017 ; Castellarin *et al.*, 2007). Cependant, cette modulation dépend de la variété (Zarrouk *et al.*, 2015). À l'opposé, un déficit hydrique important avant la véraison conduit à une diminution de la teneur en anthocyanes et en tannins dans la baie, due à une diminution de l'activité biosynthétique (Ojeda *et al.*, 2002). Des études couplant déficit hydrique modéré et température élevée à la mi-véraison ont montré que l'augmentation de la température sur cette famille de métabolites secondaires exerce une influence plus forte que le stress hydrique (Bonada *et al.*, 2013).

Conclusion

L'histoire moderne des pratiques viticoles et de la production de vins de qualité est intimement liée au développement de techniques, adossées à des travaux de recherche, permettant de faire mûrir le fruit et de comprendre les déterminants moléculaires du processus. Le changement du climat qui s'impose au monde viticole pose un nouveau paradigme. Désormais, il ne s'agit plus de faire mûrir le fruit, mais plutôt de pouvoir contrôler son niveau de maturité, afin de pérenniser la production de vin de qualité en lien avec une typicité propre au terroir dans lequel il est élaboré. En ce sens, la connaissance de l'impact de la température, de l'alimentation hydrique et de la lumière sur la composition, la qualité de la baie et celle du vin prend tout son sens.

Nous avons abordé ici l'impact du changement climatique par le prisme de la composition moléculaire fine des vins, en essayant de décrire précisément l'impact de chacun des paramètres sur l'arôme et la composition phénolique des vins blancs et des vins rouges. Mais au final, c'est bien du cumul de ces contraintes dont peut souffrir la plante, qui voit ainsi le métabolisme primaire et secondaire de la baie profondément modifié, voire altéré. Il est donc important de poursuivre la caractérisation des conséquences directes et de l'ampleur de ces changements, non seulement sur le potentiel aromatique des raisins, mais aussi sur la qualité et la perception sensorielle des vins.

Ces changements posent également la question de l'adaptation dans un contexte de préservation de la typicité des vins. Là encore, la connaissance des déterminants moléculaires de la qualité organoleptique des raisins et des vins est indispensable à une juste sélection de variétés, de clones, de porte-greffes plus tolérants aux conditions climatiques extrêmes.

IDÉOTYPES DE VIGNE POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Éric Duchêne, Élisabeth Marguerit et Aude Coupel-Ledru

Introduction

L'adaptation de la filière Vigne et vin aux changements climatiques peut être envisagée à différentes échelles géographiques, en déplaçant les zones de culture, sur différents pas de temps, mais aussi par un changement des profils des vins produits. Nous considérerons ici qu'une adaptation réussie est celle qui permet de maintenir le même volume et la même qualité de vin pour une zone donnée dans le futur. Cet objectif peut être atteint en combinant des leviers techniques comme des changements dans les pratiques à la vigne (chapitres I-6 et I-7) et en cave (chapitre I-8), ou/et par des ajustements de la localisation des vignobles en utilisant la variabilité à échelle fine (chapitre I-9). Dans ce chapitre, nous aborderons la façon dont la génétique de la vigne peut contribuer au processus d'adaptation, et nous soulèverons les questions suivantes : quelle serait la variété idéale ? comment la construire ?

Les impacts possibles sur le fonctionnement des vignes ont été décrits dans les chapitres précédents (I-3 et I-4). Pour les résumer, on s'attend en premier lieu à observer un décalage des stades phénologiques. Un débourrement plus précoce peut conduire à exposer davantage les bourgeons à des gelées printanières, en particulier dans les vignobles septentrionaux (Sgubin *et al.*, 2018). Les débuts de maturation des raisins (véraison) se décaleront, pour un cépage donné, vers les périodes plus chaudes de l'été, conduisant à des profils en métabolites secondaires modifiés et des acidités plus faibles. Une des inquiétudes les plus fortes est l'augmentation des contraintes hydriques, avec des effets négatifs possibles sur la productivité, non seulement en cours de saison, mais également sur la saison suivante. L'effet cumulé de plusieurs épisodes de sécheresse est peu étudié en raison de la difficulté à suivre de telles expérimentations au champ au cours de plusieurs cycles végétatifs.

Par ailleurs, la fréquence des événements extrêmes (vagues de chaleur avec risques de brûlures, fortes précipitations, grêle) devrait augmenter avec la hausse générale de la température (IPCC, 2021). Cette information qualitative est difficile à intégrer dans les travaux sur l'adaptation, mais il est nécessaire de la garder à l'esprit.

L'adaptation du matériel végétal peut se faire à plusieurs niveaux. Des collections de clones existent déjà et trouver de nouveaux clones pour une variété donnée avec une acidité plus élevée ou une teneur en sucres plus faible peut être réalisé assez rapidement. Un avantage pour la sélection clonale est que de nouveaux clones peuvent être cultivés sans modification des règles dans les régions viticoles existantes, y compris

les vignobles européens sous appellation d'origine contrôlée. Le point faible est que la variabilité génétique trouvée dans ces collections pourrait être trop restreinte pour répondre aux attentes à long terme sur le plan de la qualité et du rendement. Le porte-greffe peut également permettre une adaptation à la sécheresse sans modifier la typicité actuelle des vins. Enfin, il est possible de changer les variétés de greffons utilisées. C'est très certainement en combinant ces trois niveaux d'action que le matériel végétal sera d'autant plus un levier d'action incontournable.

Quelle variabilité génétique pour l'adaptation ?

L'utilisation de génotypes différents, voire nouveaux, tant pour le greffon que pour le porte-greffe, est un moyen d'adaptation très puissant. Trouver des combinaisons entre greffon, porte-greffe et mode de conduite capables de produire un vin de qualité commerciale est un objectif réaliste dans de nombreuses régions viticoles. Il est cependant difficile de garantir que le volume de production sera le même qu'aujourd'hui. Sur quelles caractéristiques construire les variétés de demain ?

Des stades de développement adaptés à la production de vins de qualité

Pour faire face à une avancée des dates de véraison conduisant à des maturations sous des températures trop élevées, la première idée est d'utiliser des clones ou des variétés mûrissant plus tard que celles actuellement utilisées. La variabilité des époques de véraison parmi les génotypes existants est bien décrite (Parker *et al.*, 2013) et les modèles sont capables de prédire les stades de développement dans le futur en utilisant des données climatiques (voir p. ex. Fila *et al.*, 2014). De nombreuses régions du génome (*Quantitative Trait Loci*, QTL) pour la phénologie ont été identifiées (Costantini *et al.*, 2008; Duchêne *et al.*, 2012 b; Gomès *et al.*, 2021) et cette information peut être utilisée pour tester l'adaptation de génotypes virtuels à différentes zones viticoles pour l'avenir. Cependant, nous avons montré qu'il est probablement impossible à l'avenir, même avec des variétés à maturation tardive, de rencontrer les mêmes conditions de maturation fraîches que celles que nous connaissons aujourd'hui (Duchêne *et al.*, 2010). En effet, il existe un écart sans cesse croissant entre une « période de maturation fraîche », de plus en plus tardive à l'automne, et le début de la maturation se déplaçant vers la période la plus chaude de l'été. L'exploration de nouvelles ressources génétiques, y compris en exploitant la variabilité entre espèces du genre *Vitis*, peut nous procurer une gamme de tardiveté plus grande. Miser sur la phénologie risque cependant d'être insuffisant et il est nécessaire de considérer au même niveau la capacité des génotypes à conserver des caractéristiques telles qu'une couleur ou une acidité des raisins stables en conditions chaudes.

Des génotypes utilisant efficacement l'eau disponible

L'efficacité d'utilisation de l'eau des cultures est un paramètre clé de l'adaptation aux étés plus secs attendus dans un futur proche et à une augmentation de la demande climatique en eau. Il existe de nombreuses façons de définir la tolérance au stress hydrique (pour une revue, voir Gambetta *et al.*, 2020). Du point de vue des vigneronns, l'efficacité d'utilisation de l'eau est la quantité d'eau nécessaire pour produire un kilogramme de

raisins mûrs. De nombreuses études ont comparé les comportements de différents génotypes de vigne sous restriction hydrique et des classifications ont été proposées (Gaudillère *et al.*, 2002; Tomás *et al.*, 2014). La compréhension du déterminisme génétique des caractéristiques gouvernant la tolérance au déficit hydrique est cependant encore fragmentaire, la première difficulté étant de choisir les caractères pertinents à étudier, qui doivent être en cohérence avec les connaissances empiriques d'adaptation à la sécheresse de certaines variétés et porte-greffes (voir encadrés I-5-1, I-5-2, I-5-3).

Encadré I-5-1. VitAdapt : optimiser l'utilisation de la diversité de *Vitis vinifera* comme levier d'adaptation au changement climatique

La diversité du matériel végétal et notamment le très grand nombre de cépages constituent une ressource importante pour l'adaptation des vignobles au changement climatique. Pour mettre à profit cette richesse, il est important de bien connaître la réponse des différents cépages à des paramètres climatiques comme la température ou le niveau de sécheresse. Le projet VitAdapt, mis en place à Bordeaux en 2009, est un outil de choix pour acquérir ces connaissances. Il repose sur un dispositif expérimental de phénotypage composé de 52 cépages (31 cépages rouges et 21 cépages blancs), parmi lesquels figurent les références bordelaises et des variétés d'origines diverses (France, Espagne, Italie, Grèce, Portugal, Bulgarie, Géorgie). Afin d'étudier spécifiquement la réponse des variétés et d'écarter les effets de la variabilité du sol sur les résultats, chaque cépage a été implanté aléatoirement sur la parcelle avec 5 répétitions de 10 souches. Un porte-greffe unique a été utilisé et la même conduite est appliquée sur l'ensemble du dispositif.

Plus de dix années de suivi ont permis d'établir une chronologie très précise de la précocité du débourrement, de la floraison et de la véraison de ces 52 cépages, avec des différences entre précoces et tardifs allant jusqu'à plus de 30 jours selon les millésimes et le stade considérés. À partir de la mi-véraison, la maturation a été étudiée avec des prélèvements hebdomadaires de raisins. Cette approche a permis de mettre en évidence des dynamiques de maturation très différentes et de regrouper les cépages en fonction de leur précocité à la véraison, de la vitesse de maturation et de la concentration finale en sucre. Les cépages plutôt tardifs et/ou à maturation lente et n'accumulant pas trop de sucres seraient *a priori* les plus à même de donner des vins équilibrés dans un contexte climatique plus chaud.

Le comportement des variétés en situation de sécheresse a également pu être étudié sur plusieurs millésimes et notamment 2022, qui a permis d'évaluer la réponse à la contrainte hydrique à l'échelle de la plante. Les cépages ont pu être classés selon le degré de défoliation, ce qui peut constituer une bonne estimation de la tolérance à la sécheresse.

D'autres paramètres, comme la résistance à certains pathogènes, la vigueur, la capacité de production ou encore la qualité et la typicité de vins obtenus par microvinifications, ont également été évalués dans le cadre de l'expérimentation.

Le projet VitAdapt représente une base de données de plus de dix années de caractérisation de nombreux cépages. Cette étude expérimentale sur le long terme a permis d'illustrer la diversité de réponses des cépages dans un contexte de sol, climat, mode de culture et de vinification donné. Afin de renforcer les connaissances sur l'adaptation des cépages en interaction avec les autres leviers agronomiques et œnologiques, le travail sera poursuivi avec l'implantation et le suivi de parcelles dans d'autres environnements pédoclimatiques, permettant ainsi une analyse des interactions génotype × environnement, en lien avec l'évolution du climat.

La classification en comportement isohydrique ou anisohydrique est l'une des méthodes proposées pour décrire la réponse des cultivars sous contrainte hydrique. Les cultivars isohydriques se caractérisent par une forte capacité à maintenir un potentiel hydrique foliaire élevé pendant la journée, tandis que le potentiel hydrique foliaire des cultivars anisohydriques dans les mêmes conditions chutera de manière significative. Les bases génétiques de ce caractère ont été étudiées par une approche QTL sur 186 génotypes (fig. I-5-1), issus d'un croisement réciproque entre Syrah et Grenache (Coupel-Ledru *et al.*, 2014).

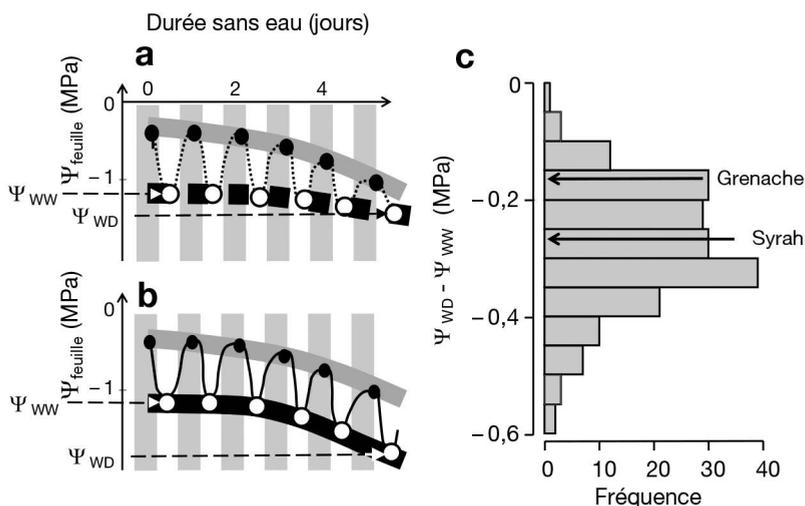


Figure I-5-1. Représentation schématique de la différence entre la réponse isohydrique (a) et anisohydrique (b) du potentiel hydrique foliaire (Ψ_{feuille}) à l'assèchement du sol, et distribution des réponses iso- à anisohydriques observées au sein d'une descendance Syrah x Grenache composée de 186 descendants (c).

L'expérience a été réalisée sur des plantes en pot, dans une serre où le potentiel hydrique du sol (ligne grise en gras et points noirs en a et b) a été contrôlé pour diminuer jusqu'à des valeurs cibles communes, en environ 5 jours pour toutes les plantes. Ψ_{feuille} oscille schématiquement chaque jour entre des valeurs d'avant l'aube, en équilibre avec le potentiel hydrique du sol (points noirs en a et b), et des valeurs de midi (points blancs en a et b). La différence de Ψ_{feuille} de midi, entre le dernier jour en conditions de déficit hydrique (Ψ_{WD}) et le premier jour, en conditions bien arrosées (Ψ_{WW}), caractérise le degré d'iso- ou d'anisohydrie rapporté en c. Source : Coupel-Ledru *et al.*, 2014.

Des QTL pour de nombreux caractères, tels que le taux de transpiration spécifique, la conductance hydraulique spécifique ou le potentiel hydrique minimal des feuilles pendant la journée, ont été mis en évidence. L'exploration des corrélations et des colocalisations entre les QTL de ces caractères suggère que l'(an)isohydrie peut être régie par un double contrôle de la conductance hydraulique et de la fermeture stomatique, plutôt que par un rôle unique du contrôle stomatique de la transpiration. Trouver la meilleure combinaison d'allèles de différents loci, conduisant au comportement optimal sous restriction hydrique au champ, nécessitera d'utiliser la modélisation des cultures (Tardieu, 2003).

Il existe également une grande variabilité entre les porte-greffes dans la tolérance au déficit hydrique, de 110 R (tolérant) à Riparia Gloire de Montpellier (non tolérant)

(Ollat *et al.*, 2015; Serra *et al.*, 2014; voir encadré I-5-2, tableau I-5-1). Marguerit *et al.* (2012) ont détecté de nombreux QTL liés au taux de transpiration, aux valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ dans les feuilles, à l'efficacité de la transpiration à l'échelle de la plante entière et à la capacité d'extraction de l'eau, en étudiant les réponses de plants de Cabernet-Sauvignon greffés sur 138 génotypes d'une descendance entre Cabernet-Sauvignon \times *Vitis riparia* Gloire de Montpellier (fig. I-5-2). Cette étude a montré que le taux de transpiration du greffon et sa plasticité au déficit hydrique sont contrôlés par le porte-greffe. Les porte-greffes peuvent donc également être sélectionnés pour améliorer la tolérance au déficit hydrique.

Encadré I-5-2. GreffAdapt, un dispositif pour accélérer la mise à disposition de nouveaux porte-greffes

La sélection de porte-greffes est un processus de longue haleine. Par conséquent, en plus de la sélection de génotypes nouvellement créés, la caractérisation des porte-greffes existants, utilisés dans le monde ou disponibles dans les collections de ressources génétiques, est d'ores et déjà une stratégie complémentaire pour élargir rapidement la gamme de porte-greffes disponibles pour les viticulteurs. GreffAdapt, un vignoble expérimental planté en 2015 à Bordeaux, a été conçu pour étudier de manière approfondie 55 porte-greffes sur le plan de la tolérance à la sécheresse et de la vigueur qu'ils confèrent (tableau I-5-1). Tous ces porte-greffes ont été associés à cinq greffons (Cabernet-Sauvignon clone 169, Grenache clone 362, Pinot noir clone 113, Syrah clone 524, Ugni blanc clone 481), sélectionnés pour représenter la diversité génétique au niveau du greffon et pour étudier dans le même temps des variétés emblématiques des principaux bassins viticoles français. Cela fait de GreffAdapt une parcelle unique au monde avec ses 275 combinaisons porte-greffe/greffon. L'objectif de ce projet est d'identifier des porte-greffes conférant des caractères d'intérêt susceptibles d'être utilisés pour élargir la gamme des porte-greffes homologués en France et pour envisager de nouvelles inscriptions au catalogue français.

Tableau I-5-1. Liste des porte-greffes étudiés dans le dispositif GreffAdapt.

Porte-greffes inscrits au catalogue français		Porte-greffes utilisés dans d'autres pays	
101-14MGt	99R	1045P	Georgikon 251
110R	BC2	106-8 MGt	Harmony
1103P	Fercal	125-1 MGt	M1
140Ru	Gravesac	157-11C	M2
1447P	125AA	225Ru	M3
161-49C	5BB	57R	M4
1616C	Nemadex A.B.	775P	Ramsey
197-17Cl	RSB1	779P	Schwarzmann
216-3Cl	Riparia Gloire de Montpellier	Binova	V15
3309C	Rupestris du Lot	Börner	
333EM	SO4	Dog Ridge	
34EM	5C	Evex 13-3	
4010Cl	8B	Evex 13-5	
41B	Vialla	Freedom	
420A		Georgikon 28	
44-53M		Georgikon 121	

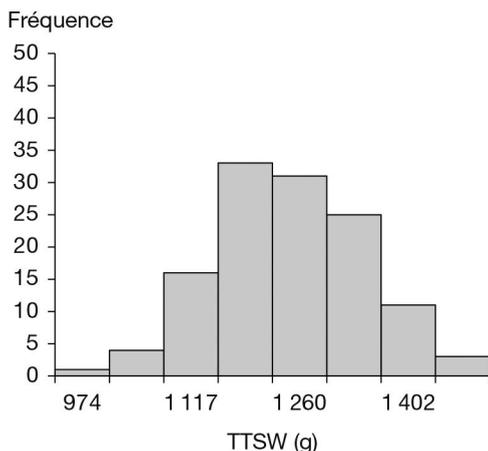


Figure I-5-2. Variabilité de la capacité d'extraction de l'eau du sol (Total Transpirable Soil Water, TTSW) dans la descendance Cabernet-Sauvignon × Riparia Gloire de Montpellier en 2008. Source : Marguerit et al., 2012.

Des génotypes au rendement stable

Le rendement est un élément crucial de la durabilité des exploitations viticoles. Il faut, d'une part, assurer une productivité qui garantisse la pérennité économique des exploitations et, d'autre part, une bonne qualité des vins, qui est souvent antinomique avec une charge en raisins élevée.

Il existe bien une forte variabilité génétique pour le potentiel de rendement (Fanizza et al., 2005). Elle peut être expliquée en grande partie par le nombre d'inflorescences par rameau (Doligez et al., 2010), qui a vraisemblablement des conséquences sur le nombre de fleurs par rameau, même si cette variable n'est que rarement rapportée (Zinelabidine et al., 2021). Le nombre de baies par grappe peut également varier entre génotypes. Zinelabidine et al. (2021) et Doligez et al. (2013) ont montré que les variations génétiques du poids d'une baie peuvent être indépendantes du nombre de pépins qu'elle contient. Bien que des gènes (revu par Carmona et al., 2008) ou des QTL (Doligez et al., 2002; Fanizza et al., 2005) aient été identifiés pour plusieurs composantes du rendement, leurs fonctions et les mécanismes génétiques sous-jacents ne sont pas complètement identifiés (Carmona et al., 2008). À ce jour, aucun marqueur moléculaire lié au rendement n'est utilisé pour réaliser de la sélection précoce assistée par marqueurs au sein des variétés de greffons.

Le maintien d'un niveau de rendement correct en conditions plus chaudes et plus séchantes est un objectif majeur pour une meilleure adaptation au changement climatique. Un déficit hydrique peut affecter la taille des baies de la saison en cours (Niculcea et al., 2014), mais également le nombre d'inflorescences / de fleurs par rameau la saison suivante (Guilpart et al., 2014). Les études de réponses des génotypes à la contrainte hydrique concernent cependant actuellement avant tout la réponse du feuillage, mais pas celle des composantes du rendement. Pour autant, la contrainte hydrique ne constitue pas le seul changement dans le fonctionnement de la vigne lié aux évolutions climatiques. Le nombre de rameaux fertiles est largement déterminé par le nombre de bourgeons laissés à la taille. Cependant, des gels de printemps inattendus ces dernières

années sont cohérents avec les prédictions des travaux scientifiques (Sgubin *et al.*, 2018). L'adaptation peut passer par des variétés au débourrement plus tardif ou capables de compenser la perte de rameaux primaires par des rameaux secondaires fertiles, caractère pour lequel il existe une variabilité génétique (Cheylus, 2021). La tolérance au gel, à stades de développement des bourgeons strictement identiques, reste un sujet de recherche très peu exploré à ce jour (Derreudre *et al.*, 1993; Fuller et Telli, 1999), l'évitement du gel passant avant tout par les dates de débourrement.

Enfin, les températures autour du débourrement sont susceptibles de modifier le nombre de fleurs par inflorescence (Petrie et Clingeleffer, 2005; Pouget, 1981), et donc le potentiel de rendement. Là encore, il n'existe pas à notre connaissance d'informations sur les réponses variétales.

Des géotypes à la composition des raisins la plus stable possible

Les effets du changement climatique sur la composition des raisins et des vins sont abordés en détail dans les chapitres I-3 et I-4 de cet ouvrage. Une forte variabilité de la teneur en sucres des baies peut être constatée en comparant les géotypes à une même date (Duchêne *et al.*, 2012a) ou, à l'inverse, à la date à laquelle la teneur en sucres atteint une valeur donnée (Costantini *et al.*, 2008). Ces valeurs dépendent cependant, d'une part, des conditions climatiques et d'alimentation en eau entre la véraison et la récolte et, d'autre part, du rapport feuille/fruit des plantes. Il a été montré, sur une descendance issue d'un croisement Riesling × Gewurztraminer, qu'en tenant compte de la variabilité génétique des dates de véraison et du rapport fruit/feuille, la variabilité génétique résiduelle du métabolisme des sucres était faible (Duchêne *et al.*, 2012a) mais réelle (Gomès *et al.*, 2021), et pouvait être reliée à des variations de séquence dans le génome. Des variétés à faible teneur en sucres et produisant des vins ne dépassant pas 10-11% d'alcool ont déjà été créées (Ojeda *et al.*, 2017), et des suivis des baies individuelles ont permis de confirmer l'existence de géotypes n'accumulant que très peu les sucres (Bigard *et al.*, 2022). Les déterminants génétiques sous-jacents restent à explorer, mais ces résultats sont encourageants.

Des températures élevées pendant la maturation sont responsables d'une diminution rapide de l'acidité des baies, en raison de la dégradation de l'acide malique (Lecourieux *et al.*, 2017). Comme il est admis que la quantité d'acide tartrique par baie est constante tout au long de la maturation des baies (Debolt *et al.*, 2008), les concentrations finales dépendent du grossissement des baies et non des températures. Les cépages à fort rapport tartrique/malique sont mieux adaptés à des conditions climatiques plus chaudes. Comme le montre la figure I-5-3, il existe une variabilité génétique pour le rapport entre la concentration en acide tartrique et la concentration en acide malique dans les géotypes de vigne (Duchêne *et al.*, 2014). Le rôle physiologique du potassium dans l'accumulation des sucres fait l'objet de débats, mais cet élément, d'une part, neutralise les acides et, d'autre part, peut former du bitartrate de potassium, insoluble, en présence d'acide tartrique. Le rapport potassium / acide tartrique est un déterminant essentiel du pH des raisins, sous le contrôle de facteurs génétiques (Duchêne *et al.*, 2020).

Un idéotype de variété du futur dont la teneur en sucres serait relativement basse et l'acidité élevée devrait avoir des raisins pauvres en potassium, mais riches en acide tartrique.

Les composés phénoliques sont des composants clés des vins : les anthocyanes pour la couleur des baies et les tannins condensés pour la structure et l'astringence du vin.

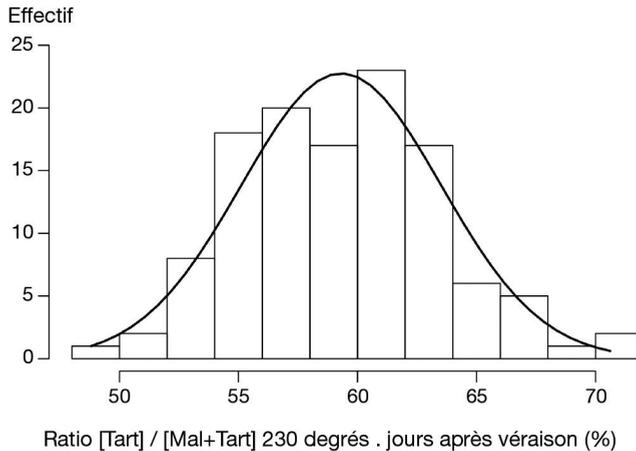


Figure I-5-3. Variabilité du rapport entre la concentration en acide tartrique et la somme des concentrations en acide malique et tartrique dans la descendance d'un croisement Riesling x Gewurztraminer (120 génotypes). Moyennes des données de 2006 à 2009. Les concentrations en acides organiques ont été mesurées 230 degrés-jours (jj) après véraison pour chaque génotype dans le vignoble expérimental INRAE de Bergheim. Source : Duchêne et al., 2014.

La diminution de la teneur en anthocyanes sous des températures élevées est bien documentée (Lecourieux et al., 2017 ; Mori et al., 2007). Des données expérimentales ont également montré que la perte de couleur du raisin sous des températures élevées était plus faible pour le Cabernet-Sauvignon ou le Pinot noir que pour le raisin Tokay (Kliewer et Torres, 1972). Les températures élevées ne réduisent pas les concentrations de toutes les anthocyanes avec la même intensité : les anthocyanes dihydroxylées sont plus touchées que les anthocyanes trihydroxylées, la malvidine-3-O-glucoside moins que la delphinidine-3-O-glucoside (Lecourieux et al., 2017). Les données de Lecourieux et al. (2017) suggèrent également que les effets des températures élevées sont d'autant plus importants que le nombre de groupements méthyl est plus faible. En parallèle, Fournier-Level et al. (2011) ont détecté un lien entre les variations génétiques sur les chromosomes 1 et 2 et les niveaux de méthylation des anthocyanes, dans une descendance Syrah x Grenache. Ces résultats indiquent que les marqueurs moléculaires peuvent être utilisés pour la sélection de variétés ayant une capacité élevée à maintenir leur coloration à de fortes températures. Des QTL ont également été proposés pour la synthèse des proanthocyanidines (Carrier et al., 2013 ; Huang et al., 2014). Ces molécules sont cependant moins sensibles aux températures que les anthocyanes (Pastore et al., 2017) et ne sont pas critiques dans le défi de l'adaptation au changement climatique.

Jusqu'à présent, il n'existe aucune information sur l'ampleur des variations, c'est-à-dire sur la plasticité, des profils aromatiques selon les variétés face à de fortes températures.

Conclusion

Le changement climatique modifiera considérablement les conditions environnementales dans la plupart, sinon la totalité, des vignobles du monde. Les impacts sur la

production de vin dépendront de la région et du type de vin produit, mais ils ne seront pas toujours négatifs : un climat plus chaud est une garantie de raisins mûrs récoltés chaque année et il offrira de nouvelles opportunités pour certaines régions actuellement trop fraîches pour produire des vins de qualité.

Les principaux risques sont, d'une part, une baisse des rendements due à la rareté de l'eau et, d'autre part, la production de vins déséquilibrés à forte teneur en alcool et à faible acidité. Les conséquences des nouvelles conditions climatiques sur les concentrations finales en métabolites secondaires (composés phénoliques, arômes) dans les vins sont plus difficiles à anticiper. Les travaux conduits en génétique souffrent de ne pas suffisamment intégrer la caractérisation œnologique des génotypes évalués au niveau agronomique. Les travaux actuels ne mettent pas encore en œuvre un pyramidage des allèles favorables des différents caractères évoqués dans ce chapitre.

La stratégie la plus immédiate consiste à tester des variétés ou des clones déjà existants. La vigne est déjà cultivée dans les régions chaudes et des milliers de cultivars sont disponibles dans les collections de ressources génétiques du monde entier (voir encadré 1-5-3). À l'exception des régions viticoles déjà à la limite chaude de l'aire viticole, il devrait être possible de trouver des combinaisons greffon × porte-greffe capables de se développer dans la plupart des régions viticoles actuelles. Trouver la bonne combinaison d'un point de vue agronomique et œnologique est cependant un objectif à moyen terme. L'acceptation de nouveaux cépages sera d'autant plus aisée que la typicité des vins sera préservée ou alors, il faudra que le consommateur accepte une évolution.

Pour le plus long terme, il est possible de créer de nouvelles variétés. Nous disposons de plus en plus de connaissances sur le déterminisme génétique des caractères liés à la phénologie, à l'utilisation de l'eau et à la composition des raisins, mais le cahier des charges de la ou les variété(s) idéale(s) n'est pas clairement établi. En d'autres termes, les objectifs pour les sélectionneurs ne sont pas si simples à définir. Même avec des techniques de sélection efficaces, il faut environ 10 ans entre l'obtention d'une graine et la mise à disposition d'une variété, et encore plus pour que cette variété soit cultivée sur des surfaces importantes. Certainement pour la première fois dans l'histoire de la création variétale, les conditions environnementales vont changer entre le moment où les variétés sont évaluées et celui où les viticulteurs les utiliseront. Il est ainsi nécessaire d'anticiper le comportement des génotypes dans de nouvelles conditions environnementales. Cela requiert non seulement des modèles fiables pour prédire les conditions climatiques futures, mais également des modèles de culture capables d'intégrer les variations alléliques et les réponses aux données environnementales. En utilisant de tels modèles, les sélectionneurs seront en mesure d'identifier la meilleure combinaison d'allèles pour un ensemble donné de conditions climatiques, avant d'engager un programme de sélection qui utilisera toutes les techniques modernes pour révéler l'information génétique dans les descendances. Souvent, les déterminismes génétiques ne sont pas établis dans plusieurs fonds génétiques, dans plusieurs descendances, et ne mettent pas en évidence de régions génétiques majeures mais bien plusieurs régions, expliquant une faible part de la variance du caractère étudié. Les méthodes basées sur la sélection génomique visent à construire des modèles les plus universels possibles, en valorisant toute l'information génétique disponible pour prédire un phénotype. Elles seront potentiellement incontournables pour progresser dans la construction des génotypes du futur.

Le changement climatique est susceptible de modifier la production de vin dans de nombreuses régions du monde. À ce jour, la diversité génétique de la vigne permet sa culture et la production de vin dans une large gamme de conditions environnementales à travers le monde. À l'avenir, cette variabilité existante pourra être utilisée, ou étendue par la reproduction sexuée, pour apporter des solutions d'adaptation à cette nouvelle donne environnementale.

Encadré I-5-3. Mobilisation de la collection ampélographique de Vassal-Montpellier

Le centre de Ressources biologiques de la vigne de Vassal-Montpellier (Marseillan, Hérault) est dédié à la conservation, la caractérisation et la valorisation des ressources génétiques de la vigne. Ce conservatoire fut créé en 1949 à l'initiative du professeur J. Branas de l'école d'Agriculture de Montpellier (aujourd'hui Institut Agro Montpellier), à partir de la collection ampélographique initiée en 1876 par G. Foëx, puis agrandie par L. Ravaz. Depuis 147 ans, cette collection n'a cessé d'être enrichie par des dons, des prospections et des échanges, sous l'impulsion de spécialistes comme D. Boubals, P. Galet, J.-M. Boursiquot et surtout P. Truel, son directeur de 1954 à 1985.

Le conservatoire est aujourd'hui composé de plus de 8000 accessions de vigne, provenant de 55 pays viticoles, représentant environ 2800 cépages, 450 lambrusques, 1000 hybrides interspécifiques, 300 porte-greffes et 60 espèces de Vitacées. Cette richesse et cette diversité en font une collection ampélographique unique au monde. Le matériel végétal regroupé a vocation à être redistribué aux différents acteurs du secteur vitivinicole (producteurs, hybrideurs, chercheurs, etc.), sous forme de boutures, de pollen, de pépins ou de matériel frais.

Les vignes conservées sont systématiquement caractérisées sur le plan morphologique (descripteurs de l'OIV et de l'UPOV, Union pour la protection des obtentions végétales), phénologique (débournement, floraison, véraison, maturité), agronomique (vigueur, composantes du rendement, sensibilités), technologique (qualité de la baie, microvinifications), sanitaire (principales viroses), génétique (données de ségrégation, empreintes génétiques, généalogies) et bibliographique (historique, diffusion). Les données sont partagées dans le cadre de partenariats. L'objectif est d'identifier les variétés et de documenter leur potentiel pour répondre aux demandes des scientifiques, sélectionneurs, professionnels de la filière vitivinicole et amateurs. Le fonds documentaire, composé de dossiers variétaux (5000), d'herbiers (14000), d'une bibliothèque spécialisée et d'une photothèque (50000 clichés), est en cours de numérisation pour une diffusion intégrale sur Internet.

Dans le cadre de l'adaptation au changement climatique, la mobilisation de ces ressources peut prendre plusieurs formes comme :

- la fourniture de variétés pour expérimenter une diversification de l'encépagement (variétés anciennes ou étrangères, porte-greffes, etc.);
- la définition de collections de travail représentatives de la diversité globale ou de cibles de sélection particulières, pour analyser les déterminants génétiques de caractères d'intérêt;
- l'utilisation de phénotypes extrêmes pour des croisements visant à obtenir de nouvelles variétés mieux adaptées.

MODES DE CONDUITE ET GESTION DES SOLS

Aurélié Métoy, Raphaël Métral, Christophe Gaviglio et Cornelis Van Leeuwen

Il n'existe pas de solution unique pour s'adapter au changement climatique. Rien qu'au niveau technique, il est important de prendre en compte les différentes échelles spatiotemporelles d'adaptation des systèmes et d'envisager une combinaison de leviers mobilisables à court, moyen et long termes. L'objectif est de faire face à la variabilité interannuelle du climat par le biais de pratiques annuelles, et d'assurer la durabilité du vignoble par des choix plus pérennes (Naulleau *et al.*, 2021). Après avoir abordé le levier génétique dans le chapitre précédent, nous envisageons ici ce qui relève de la gestion des sols et des modes de conduite. Outre l'adaptation, ces pratiques peuvent également contribuer à l'atténuation des effets du changement climatique et au maintien de la biodiversité.

Enjeux de la gestion du sol face au changement climatique

Du fait des pratiques en vigueur et des conditions pédoclimatiques qu'elle rencontre, la viticulture est particulièrement exposée à certaines contraintes comme l'érosion, la diminution de la teneur en matière organique, le tassement des sols et l'appauvrissement de leur biodiversité (Garcia *et al.*, 2018).

Les contraintes supportées par les sols viticoles

Les problèmes rencontrés sont principalement dus au travail du sol et à la faible fréquence d'amendements et de restitutions organiques, souvent observée en viticulture (Salomé *et al.*, 2016), qui ne permet pas d'entretenir le stock de carbone organique, central pour la stabilité des sols (Abiven *et al.*, 2009; Agreste, chiffres et données 2020). Par ailleurs, la vigne est souvent cultivée en coteaux, là où d'autres cultures ne pourraient pas être implantées, et les parcelles sont régulièrement désherbées pour limiter les risques de compétition (Ambiaud, 2012). La structure en rangs des vignobles, combinée à la dormance hivernale de la vigne, expose en outre parfois une forte proportion de sols aux intempéries. L'ensemble de ces facteurs fait de la viticulture une des occupations du sol les plus sujettes à l'érosion (Bissonnais *et al.*, 2004; Raclot *et al.*, 2009). Le ruissellement de l'eau et l'érosion des sols conduisent de plus au transport de certaines molécules herbicides, qui engendre alors la contamination des cours d'eau (Louchart *et al.*, 2001).

En contexte viticole, l'élaboration de stratégies de conservation des sols doit donc privilégier en premier lieu les occupations et pratiques réduisant la sensibilité des terres à l'érosion (c'est-à-dire renforçant l'agrégation, la structure des sols). Ainsi, les pratiques

de gestion de l'interrang basées sur des enherbements temporaires se développent fortement en réponse aux enjeux de réduction d'usage des herbicides et de travail du sol notamment (Fernández-Mena *et al.*, 2021). Quand ce levier d'action ne peut être envisagé ou suffisant, aménager l'espace agricole en courbes de niveau, ou via la plantation d'arbres notamment, afin de favoriser le stockage des volumes de sols érodés sur les versants, constitue un autre levier essentiel. Dans ce cas, il s'agit d'éviter la perte en terre vers le réseau hydrographique (Follain *et al.*, 2018).

Les coûts de la gestion des sols

Les coûts d'entretien des sols viticoles varient selon de nombreux facteurs tels que la région viticole, la superficie et les modes de conduite du vignoble, le type de sol, le matériel utilisé, la main-d'œuvre, les techniques agronomiques. Dans le cas d'un travail du sol régulier, ils peuvent représenter un poste important des charges viticoles. Selon les données d'Agreste de 2020, le coût moyen total des travaux mécaniques liés à l'entretien des sols en viticulture est d'environ 427 euros par hectare en France. En général, les coûts d'entretien des sols viticoles incluent des opérations telles que le labour, le désherbage, la fertilisation, l'amendement, l'irrigation (Metay *et al.*, 2022). À noter que, dans l'interrang comme sur le cavaillon (sous le rang), le travail mécanique du sol représente des coûts souvent deux à trois fois plus élevés que l'utilisation d'un herbicide (Constant *et al.*, 2019). En effet, la mise en œuvre du désherbage mécanique se traduit par un impact significatif sur les deux postes les plus énergivores à la vigne (le poste « carburant », jusqu'à plus de 25 L/ha pour la houe rotative, contre moins de 5 L pour les rouleaux, et le poste « matériel »), ainsi que sur les coûts de main-d'œuvre. Par ailleurs, cette opération augmente généralement l'érosion dans les vignobles en pente (Biddoccu *et al.*, 2017). En outre, lorsque la mécanisation du travail du sol et du cavaillon est trop compliquée ou insuffisamment efficace, il est nécessaire d'intervenir à la main : ces travaux sont particulièrement pénibles et représentent un temps de travail et un coût importants pour l'exploitation. Dans le mode de gestion « mixte », souvent utilisé, la gestion des adventices dans l'interrang repose majoritairement sur le désherbage mécanique et/ou l'enherbement avec tonte, tandis que le désherbage du rang repose sur l'utilisation d'un herbicide chimique : se passer des herbicides sous le rang reste un enjeu et une difficulté non négligeable (Metay *et al.*, 2022).

La gestion du sol : s'adapter au changement climatique voire l'atténuer

Plusieurs pratiques d'entretien des sols viticoles peuvent être mises en place pour s'adapter à ces changements et en atténuer les effets sur le sol et les cultures. Premièrement, il est essentiel d'adopter des pratiques culturales permettant de retenir l'eau dans le sol, telles que la couverture végétale permanente entre les rangs de vigne ou encore l'utilisation de *mulch* organique en surface, l'introduction d'arbres dans les parcelles ou autour. Ces pratiques permettent de limiter l'érosion et d'augmenter la capacité de rétention d'eau du sol, réduisant ainsi les risques de stress hydrique. Toutefois, un développement très important du couvert végétal au niveau de l'interrang augmente la transpiration de l'eau du sol et risque d'engendrer des compétitions hydrominérales (Celette et Gary, 2013). Deuxièmement, il est conseillé d'adapter les éventuelles méthodes d'irrigation aux besoins en eau de la vigne, en utilisant des outils de mesure de la teneur en eau du sol pour ajuster les quantités d'eau apportées.

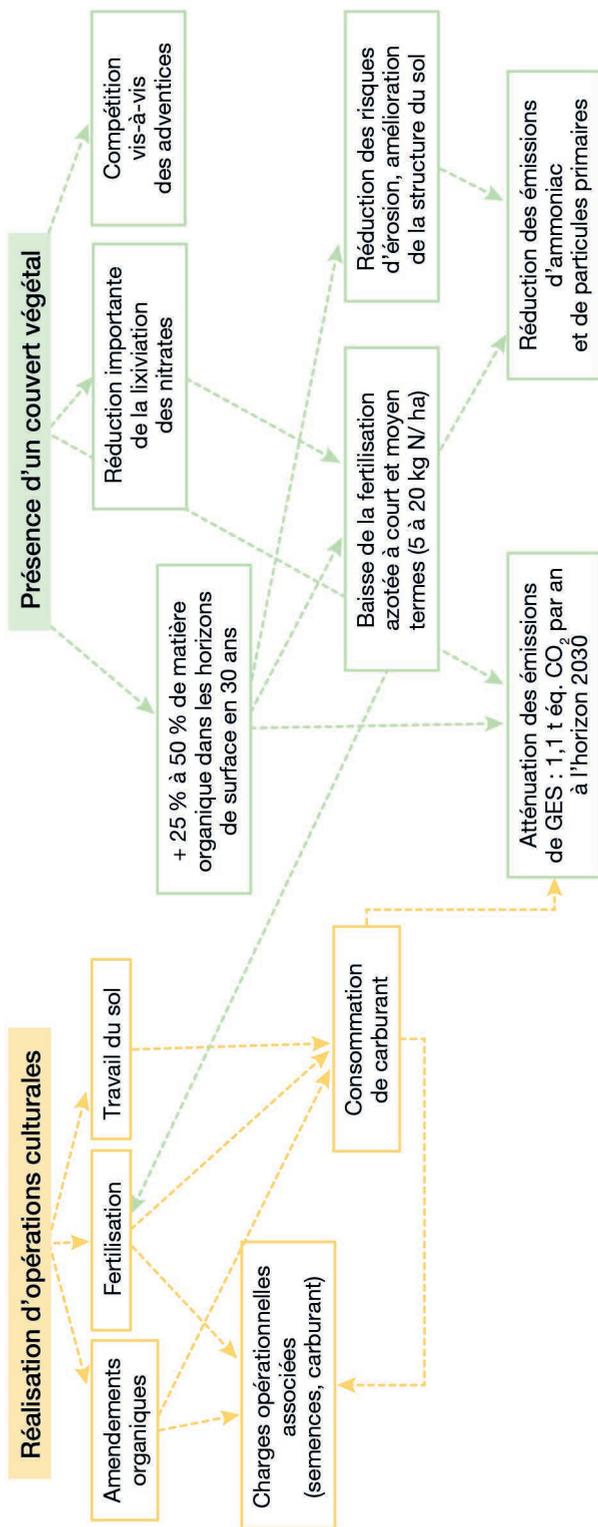


Figure I-6-1. Pratiques d'entretien du sol, en lien avec l'adaptation au changement climatique et à son atténuation. Cas d'un couvert végétal intégrant des légumineuses. D'après fiche Ademe, Cultiver des légumineuses pour limiter l'utilisation des intrants de synthèse, fiche n° 5, <https://lbrairie.ademe.fr/cadic/2018/6-cultiver-des-legumineuses-reference-ademe-8130.pdf> (consultée le 14/01/2024).

Dans le même temps, la gestion des sols viticoles peut jouer un rôle important dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, en favorisant le stockage du carbone dans le sol. Par exemple, la pratique de la viticulture enherbée, qui consiste à maintenir une couverture végétale entre les rangs de vigne, permet de favoriser la restitution de matière organique au sol, ce qui participe ainsi à l'immobilisation du carbone dans le sol (Autret *et al.*, 2016). De plus, l'utilisation d'amendements organiques et de compost peut également contribuer au stockage du carbone dans le sol. D'autres pratiques, comme la réduction de l'utilisation de fertilisants azotés et l'optimisation de la gestion de l'eau, peuvent à leur tour contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre, en limitant les conditions favorables à la dénitrification et donc en limitant les émissions de N_2O . Enfin, la gestion raisonnée des sols et la réduction des labours peuvent elles-mêmes favoriser le stockage du carbone dans le sol en surface (0-10 cm; Cai *et al.*, 2022), en préservant la matière organique et en limitant l'érosion (fig. I-6-1). Notons toutefois que si l'on considère l'ensemble des horizons anthropiques, jusqu'à 60 cm, aucune modification du stock de carbone n'est observée après arrêt du travail du sol (Autret *et al.*, 2020). Ces pratiques sont détaillées dans la section suivante.

L'entretien du sol

Les pratiques culturales de travail mécanique du sol, de désherbage, de fertilisation et d'apports d'amendements constituent autant de leviers à combiner pour augmenter la résilience de la vigne au changement climatique et limiter son impact environnemental.

Travail profond pour la préparation des sols avant plantation

Il est important d'avoir un bon état structural (porosité) sur l'ensemble du profil de sol dès la plantation de la vigne, afin de favoriser le développement racinaire et l'exploration du sol en profondeur par les racines. L'observation du profil cultural est conseillée avant tous travaux de préparation du sol pour une plantation (Gautronneau, 1987), en raison du risque de compaction que la plantation peut engendrer. La réalisation d'un diagnostic préalable permet d'adapter les outils qui décompactent le sol en profondeur (par ex. forme et taille des dents ou lames) ainsi que la profondeur de travail du sol. L'objectif principal est d'assurer le décompactage des horizons tassés et la fissuration du sol pour favoriser un bon enracinement sur l'ensemble du profil. Les labours profonds qui mélangent les horizons de surface où se concentre l'activité biologique et diluent la matière organique sont à proscrire... Le risque de compaction des sols dépend à la fois de leurs caractéristiques, comme la texture et le taux de cailloux, et des pratiques culturales raisonnées par chaque viticulteur. Ainsi, les sols viticoles sont particulièrement sujets au tassement du fait des nombreux passages d'engins pour les interventions techniques (Polge de Combret-Champart *et al.*, 2013).

Désherbage mécanique et chimique

Le désherbage en viticulture est en pleine mutation en raison des restrictions d'usage appliquées au glyphosate et des solutions alternatives sont activement recherchées.

Du changement dans les pratiques de désherbage chimique

Avec la nouvelle préconisation de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), les vignerons ne peuvent plus réaliser que deux applications de glyphosate par an, en sortie d'hiver et durant l'été (fig. I-6-2A). Cette restriction à 450 g par an et par hectare, en lieu et place des 2160 g par an et par hectare, a pour conséquence d'introduire des changements de pratiques importants dans l'entretien du sol mais pas nécessairement favorables à l'atténuation du changement climatique. Ainsi, le développement de pratiques de désherbage mécanique plus régulières augmente la consommation d'énergie fossile. Les stratégies classiques de désherbage sous le rang faisant appel à la combinaison d'interventions foliaires systémiques et de préémergence sont plus difficiles à mettre en œuvre. Les vignerons qui souhaitent conserver le désherbage chimique pour l'entretien du cavaillon doivent remettre en place un désherbage hivernal et des antigraminées spécifiques pour éviter les difficultés au début du printemps. La conséquence en est l'utilisation d'autres molécules à l'efficacité moins marquée et une augmentation du nombre d'interventions (3 au lieu de 2) nécessaires pour maintenir le cavaillon nu sur une largeur compatible avec les objectifs de production. En cas de présence de vivaces, seule la matière active glyphosate est efficace, mais la dose de 450 g/ha/an ne permet pas de conserver la même efficacité pour une surface traitée équivalente. La réduction de la largeur traitée est alors une façon de conserver l'efficacité sur la zone traitée, pour une intervention, en augmentant de fait la partie du vignoble non désherbée. Il faut donc envisager d'introduire progressivement des pratiques d'entretien mécanique, ou d'autres alternatives, dans l'itinéraire. D'après Agreste, la moitié des vignes est désherbée de façon mixte (chimique et mécanique). Celles qui n'utilisent que le désherbage chimique représentent 20% du vignoble, soit 11 points de moins qu'en 2016. En revanche, le « tout mécanique » progresse : il concerne 27% du vignoble (+8 points), dont la quasi-totalité des surfaces en viticulture biologique. Pour compenser l'interdiction de tout désherbant chimique, les viticulteurs « bio » effectuent en moyenne 4,2 passages mécaniques (parfois simultanément sous et entre les rangs), contre 2,6 en conventionnel.

Des méthodes alternatives, mais plus chronophages et énergivores

L'alternative la plus disponible pour les viticulteurs est le désherbage mécanique. Il existe en effet de nombreux outils sur le marché pour répondre à la plupart des situations. Le désherbage mécanique est efficace lorsqu'il est bien maîtrisé, mais il demande 4 à 6 fois plus de temps de travail que le désherbage chimique (cas des houes rotatives ; fig. I-6-2B). Sans persistance d'action, il faut intervenir plus souvent, et la vitesse de travail est limitée pour réduire les risques de blessures sur souches. Dans la pente ou le dévers, les réglages sont difficiles et le risque d'érosion est réel. Il existe un risque de perturbation du réseau racinaire. La consommation énergétique associée au travail du sol dépend du type d'outil, passif ou animé par la prise de force, mais est supérieure à celle du désherbage chimique. Dans une perspective d'adaptation au changement climatique, on observe ainsi que la plupart des alternatives présentent l'inconvénient d'être plus chronophages et énergivores. Ce constat interpelle sur des changements plus profonds que des substitutions de pratiques pour rendre compatibles la réduction des intrants et la limitation des émissions de GES (place des couverts et modes de gestion innovants).



Figure 1-6-2. A : application de désherbants chimiques sous le rang ; B : houes rotatives montées sur enjambeur ; C : machine de désherbage thermique au gaz propane ; D : prototype de désherbeur électrique. © Christophe Gaviglio, IFV81.

Le désherbage thermique (fig. 1-6-2C) est efficace, car les machines permettent d'orienter la chaleur vers les adventices pour leur appliquer un choc thermique qui fait éclater leurs cellules. Mais il est lent et demande de nombreux passages (5 à 8). Le temps et l'énergie nécessaires (gaz et carburant du tracteur) limitent l'intérêt de la technique à des vignes en pente ou avec des sols très superficiels dans lesquels on ne souhaite pas de travail du sol. Des variantes existent, avec de la mousse ou de l'eau chaude, pour accentuer la durée d'application de la chaleur.

Le désherbage électrique (fig. 1-6-2D), développé par la société Zasso, est une méthode alternative intéressante pour son mode d'action et son champ d'application. Le principe est de créer des arcs électriques entre des électrodes fixes dans l'interrang et une électrode mobile passant entre les souches. Ces arcs électriques se diffusent dans les parties conductrices : feuilles, tiges et potentiellement racines des adventices, ce qui en ferait

une alternative avec un effet systémique, sans travailler le sol. La puissance électrique est fournie par une génératrice entraînée par la prise de force. Cette solution serait utilisable dans un grand nombre de configurations, dont celles difficiles à gérer avec le travail du sol. Il faut un sol ressuyé pour concentrer les arcs électriques produits sur les adventices. L'enjeu est de trouver une vitesse de travail satisfaisante pour limiter le temps et les consommations énergétiques.

Les évolutions des pratiques d'entretien du sol au niveau du désherbage du cavaillon sont caractérisées soit par l'utilisation de plus d'herbicides avec plus d'intervention, soit par la mise en œuvre de pratiques de substitution aux herbicides plus énergivores. Cependant, en ce qui concerne la gestion du sol au sens large, les pratiques de fertilisation ou l'utilisation des couverts, même temporaires, permettent de stocker plus de carbone dans les sols (Garcia *et al.*, 2018).

Une fertilisation azotée à moduler

Les plantes pérennes, y compris la vigne, ont besoin d'azote pour se développer, même si leurs exigences sont moins élevées que celles des grandes cultures. Contrairement à ces dernières, elles accumulent des réserves d'azote pendant leur cycle végétatif et les stockent dans leurs parties pérennes pour les remobiliser au démarrage du cycle suivant. Pour elles, la gestion de l'azote doit intégrer également l'objectif de rendement et de qualité des raisins. Un excès d'azote peut nuire à la qualité et favoriser les bioagresseurs, tandis qu'une carence peut affecter la qualité et la quantité de la récolte. La fertilisation azotée contribue au bilan gaz à effet de serre. En effet, l'azote apporté aux cultures peut être transformé en oxyde nitreux (N_2O), un puissant gaz à effet de serre, par des processus de nitrification et de dénitrification dans le sol (IPCC, 2019). Selon l'Ademe²⁶ (2013), la fertilisation azotée représente environ 20% des émissions de N_2O agricole, soit environ 1,6 million de tonnes équivalent CO_2 par an. Sa gestion est donc un enjeu important pour limiter les émissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture. Les viticulteurs peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les plantes et minimiser l'apport d'azote dans le vignoble en adaptant le matériel végétal, la gestion du sol et de l'azote, et l'équilibre de la vigne aux conditions environnementales. Gérer l'azote dans les vignobles implique donc de rechercher un équilibre entre le développement végétatif (vigueur), l'optimisation de la composition du raisin, la régulation des coûts de production et la limitation de la pollution (Champagnol, 1984; Chantelot *et al.*, 2004; Spayd *et al.*, 2002).

Des amendements précieux

Par définition, les amendements sont des produits organiques ou minéraux apportés au sol pour en améliorer les propriétés (structure, taux de matière organique, pH, par exemple) (fig. 1-6-3). Les apports d'amendements organiques en viticulture peuvent être efficaces pour augmenter le taux de matière organique dans le sol, à condition d'apports assez réguliers (toutes les 3 à 5 ans) de quantités importantes (à raison de plusieurs tonnes par hectare de marc de raisin, compost...). Selon une étude menée en France, l'application de compost de déchets verts et de fumier de bovin dans les vignes

26. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3468-quelle-contribution-de-l-agriculture-francaise-a-la-reduction-des-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-.html> (consulté le 14/12/2023).

a permis d'augmenter le taux de matière organique du sol de 0,7 à 1,3% en moyenne après quatre ans d'application (Mamy *et al.*, 2014). Cette pratique est cohérente avec une agriculture plus respectueuse de l'environnement, car elle permet l'utilisation de déchets organiques compostés comme amendements du sol et fournit les éléments nutritifs nécessaires à la production alimentaire. D'après une étude récente conduite en Espagne sur l'effet d'une application de trois différents déchets organiques compostés ou amendements organiques, pendant 13 années, sur la qualité du sol et les émissions de gaz à effet de serre, la qualité du sol a été constamment améliorée par l'application d'amendements au cours de ces 13 années (Calleja-Cervantes *et al.*, 2015). Même si les émissions de GES dans le sol ont augmenté en raison de l'application des amendements, la teneur en matière organique du sol a augmenté de manière significative (au moins 35% de plus dans tous les traitements organiques par rapport au contrôle) et cette augmentation a été constante au fil des ans. Cependant, l'efficacité d'un amendement organique peut dépendre de différents facteurs tels que la qualité de l'amendement, la dose appliquée, la fréquence d'application et les propriétés du sol. Il est donc important d'adapter les pratiques d'application à chaque situation particulière, afin d'optimiser les effets sur le taux de matière organique dans le sol.



Figure I-6-3. Épandage d'amendement en vigne (Languedoc). © Yves Bouisson, INRAE.

La couverture du sol

Recouvrir le sol de manière temporaire ou permanente, via des matières exogènes ou un enherbement semé ou permanent, peut présenter des avantages en matière d'adaptation au changement climatique et d'atténuation. La gestion de ces couvertures doit être adaptative en fonction des conditions climatiques de l'année.

Mise en place d'un mulch pour limiter l'évaporation

Le paillage, ou utilisation de *mulchs* végétaux, est une technique qui permet de gérer la phase d'implantation du vignoble sans herbicide et sans travail du sol. En effet, la gestion du cavaillon sans herbicide sur jeunes vignes est pour le moins complexe, délicate, risquée

pour les plants et chronophage. Le paillage avec un feutre ou un géotextile adapté, prétroué pour pouvoir planter, permet (plus que le *mulch*) de simplifier considérablement la gestion du sol sous le rang pendant les trois premières années de la jeune vigne (croissance, formation du tronc), avant sa mise en production (fig. I-6-4A). En dehors du broyage, le coût du paillage est généralement élevé et il faut compter environ un euro par mètre linéaire pour une durée de trois ans. Cette couverture du sol a un impact sur la température et l'humidité du cavaillon. L'expérience montre que, généralement au bout de trois ans, les matières biodégradables ne remplissent plus leur rôle et on bascule sur un autre mode de gestion. La dégradation de la matière (quand il s'agit de solution biodégradable) est due à l'activité des microorganismes du sol et peut engendrer un phénomène de faim d'azote, car ces derniers vont consommer l'azote du sol pour se multiplier. Il arrive aussi que les paillages soient dégradés par le gros gibier, car les sangliers, en particulier, repèrent assez rapidement que la zone abrite plus de vers de terre.



Figure I-6-4. A : feutre installé sous le rang ; B : mélange engrais vert (moutarde blanche, fêverole et avoine) à forte biomasse avant destruction ; C : enherbement sous le rang tondu ras ; D : couvert spontané géré par tonte et travail du sol, en parcelle viticole méditerranéenne. © Christophe Gaviglio, INRAE UMR Absys (A, C) ; INRAE UMR Absys (B) ; Marie-Charlotte Bopp, INRAE UMR Absys (D).

Lorsque l'on souhaite utiliser pour couvrir le rang la biomasse produite par un couvert présent dans l'interrang, il faut à la fois un matériel adapté et une faible couverture herbacée sur le rang, afin de déposer ce qui est fauché à plat. Le matériel le plus indiqué serait une faucheuse frontale pour éviter de rouler sur le couvert avant de le couper, tout comme de le broyer en petits éléments qui se dégradent plus vite. Avoir une forte biomasse dans l'interrang pour l'épandre, au moment de sa destruction, sur un cavaillon peu couvert repose impérativement sur une stratégie de désherbage hivernal efficace.

Culture de service ou couverts végétaux pour améliorer le stockage de carbone

L'implantation d'un couvert végétal en association avec la vigne, ou couvert intercalaire, est une pratique agroécologique susceptible de rendre de nombreux services écosystémiques. En particulier, l'enherbement des interrangs est une pratique vertueuse pour la protection des sols (contre l'érosion), pour la portance vis-à-vis de la mécanisation, la réduction du recours aux intrants (phytosanitaires, engrais de synthèse dans le cas de couverts à base de plantes de la famille des Fabacées), la réduction du transfert de polluants vers l'environnement (Schreck *et al.*, 2008; Tournebize, 2001). Il favorise également l'amélioration de la fertilité des sols : augmentation de la stabilité structurale (Garcia *et al.*, 2019), de la teneur en matières organiques en surface par le biais de la restitution des résidus de tonte et de l'humification des racines. Enfin, il crée un écosystème favorable au développement de la flore et de la faune du sol (Coll *et al.*, 2009) (fig. I-6-4B). Sur l'ensemble des vignobles, l'évolution des pratiques d'entretien du sol concerne essentiellement l'entretien des interrangs.

Cependant, cette présence végétale, mise en place de façon permanente, est susceptible de concurrencer la vigne pour l'eau et l'azote du sol (Gontier et Gaviglio, 2013). Cette concurrence peut se traduire par des niveaux bas d'azote assimilable dans les moûts, susceptibles de nuire à la qualité organoleptique du vin, voire par une pénalisation des rendements ne permettant pas d'atteindre les objectifs de production visés, déjà susceptibles de diminuer dans un contexte d'adaptation au changement climatique. Pour pallier d'éventuelles carences azotées, des destructions précoces du couvert et l'utilisation d'une fertilisation foliaire sont envisageables (Gontier et Gaviglio, 2013).

En 2019, 64% des vignes françaises étaient enherbées entre les rangs, soit 12% de plus qu'en 2016 (Agreste, 2019); 43% le sont en permanence, que ce soit un interrang sur deux ou sur tous les interrangs; 19% le sont seulement de façon temporaire, part qui a doublé par rapport à 2016. En particulier, un engrais vert a été semé entre les rangs de 4% des vignes en 2019 contre 1% en 2016. L'enherbement des interrangs est aussi répandu en viticulture biologique qu'en conventionnelle. Mais en bio, ce couvert végétal est plus fréquemment temporaire, détruit en cours de campagne presque une fois sur deux.

Sous les ceps, un couvert végétal, le plus souvent spontané et provisoire, pousse dans 12% des vignes, deux fois plus qu'en 2016 (fig. I-6-4C). Particulièrement présent dans les bassins méridionaux (trois quarts du vignoble corse, un tiers du Gaillacois...), il concerne aussi près d'un quart du vignoble bio. On peut étendre l'enherbement au cavaillon comme une alternative au désherbage. Alors que le désherbage mécanique interceps est complexe, la tonte est plus simple : le problème de profondeur de travail disparaît

par exemple. Mais l'approche des souches est aussi délicate et impose une vitesse de travail assez faible. Le désherbage, abandonné sous le rang, doit éventuellement être compensé par un travail des interrangs ou une fertilisation (foliaire ou enterrée), pour éviter une concurrence trop forte qui se traduit sur la vigueur et le rendement.

Gestion de l'enherbement spontané

L'implantation des cultures de service dans les vignobles n'est pas toujours aisée en raison de la variabilité des pluies automnales au moment de leur semis, particulièrement en zone méditerranéenne, dans le contexte du changement climatique. Ainsi, la gestion de l'enherbement spontané en viticulture doit être considérée comme une opportunité pour promouvoir des pratiques agricoles plus durables et ainsi contribuer à la lutte contre le changement climatique (Bopp *et al.*, 2022; Genty *et al.*, 2023; fig. I-6-4D). Cette végétation spontanée des vignes peut avoir un impact sur la gestion des sols viticoles face au changement climatique. En effet, avec des épisodes de sécheresse plus fréquents et intenses, la compétition entre les adventices et la vigne pour l'eau et les nutriments peut s'intensifier. Pour gérer efficacement les adventices, des pratiques agroécologiques peuvent alors être mises en place (encadré I-6-1). Par exemple, la gestion de la couverture végétale permanente entre les rangs de vigne permet de limiter la croissance des adventices et de préserver la biodiversité des sols. L'utilisation de techniques de désherbage mécanique ou thermique permet également de réduire l'utilisation d'herbicides chimiques et donc les émissions de gaz à effet de serre. En outre, la présence d'adventices peut avoir un effet bénéfique sur les sols viticoles. Certaines d'entre elles, comme la luzerne ou le trèfle, ont la capacité de fixer l'azote de l'air dans le sol, améliorant ainsi la fertilité et la qualité du sol.

Encadré I-6-1. Agroécologie et changement climatique

Le changement climatique est un défi pour la durabilité des systèmes viticoles. Or, l'agroécologie fournit à la fois des solutions d'adaptation au changement climatique et des leviers pour la mitigation de ses effets. Elle propose de s'appuyer le plus possible sur les régulations naturelles pour conjuguer la production d'aliments ainsi que la conservation et régénération des ressources mobilisées, notamment en favorisant une meilleure santé des sols, une biodiversité accrue et un degré élevé de diversification au sein des systèmes de production agricole. Le transfert et la communication sur des pratiques viticoles contribuant à une viticulture agroécologique sont donc fondamentaux pour construire la viticulture de demain, en prise avec des aléas climatiques extrêmes.

La profession viticole, en particulier les viticulteurs, sont les premiers à constater les effets du changement climatique dans leurs parcelles. Pour cette raison, nombreux sont ceux engagés dès à présent dans une transition agroécologique plus ou moins ambitieuse. Les transformations des parcelles viticoles sont déjà visibles sur le terrain.

Un certain nombre de leviers ont déjà été répertoriés par enquête dans des domaines viticoles innovants et fortement agroécologiques. Ces leviers, exprimés par les viticulteurs eux-mêmes, visent le double objectif d'adaptation et de mitigation des effets du changement climatique (fig. I-6-5).

L'introduction d'arbres d'ombrage en particulier est prometteuse pour les systèmes viticoles. Dans toutes les régions viticoles françaises, il est possible de croiser des

•••

...

arbres dans les parcelles. Les modalités d'implantation sont diverses : infraparcellaire ou autour des parcelles, arbres à bois ou arbres fruitiers. Les connaissances scientifiques sur les interactions arbres-vigne restent limitées pour le moment (limitation du gel, ombrage et limitation des coups de soleil, concurrence hydrique et azotée), mais les recherches sont très actives.

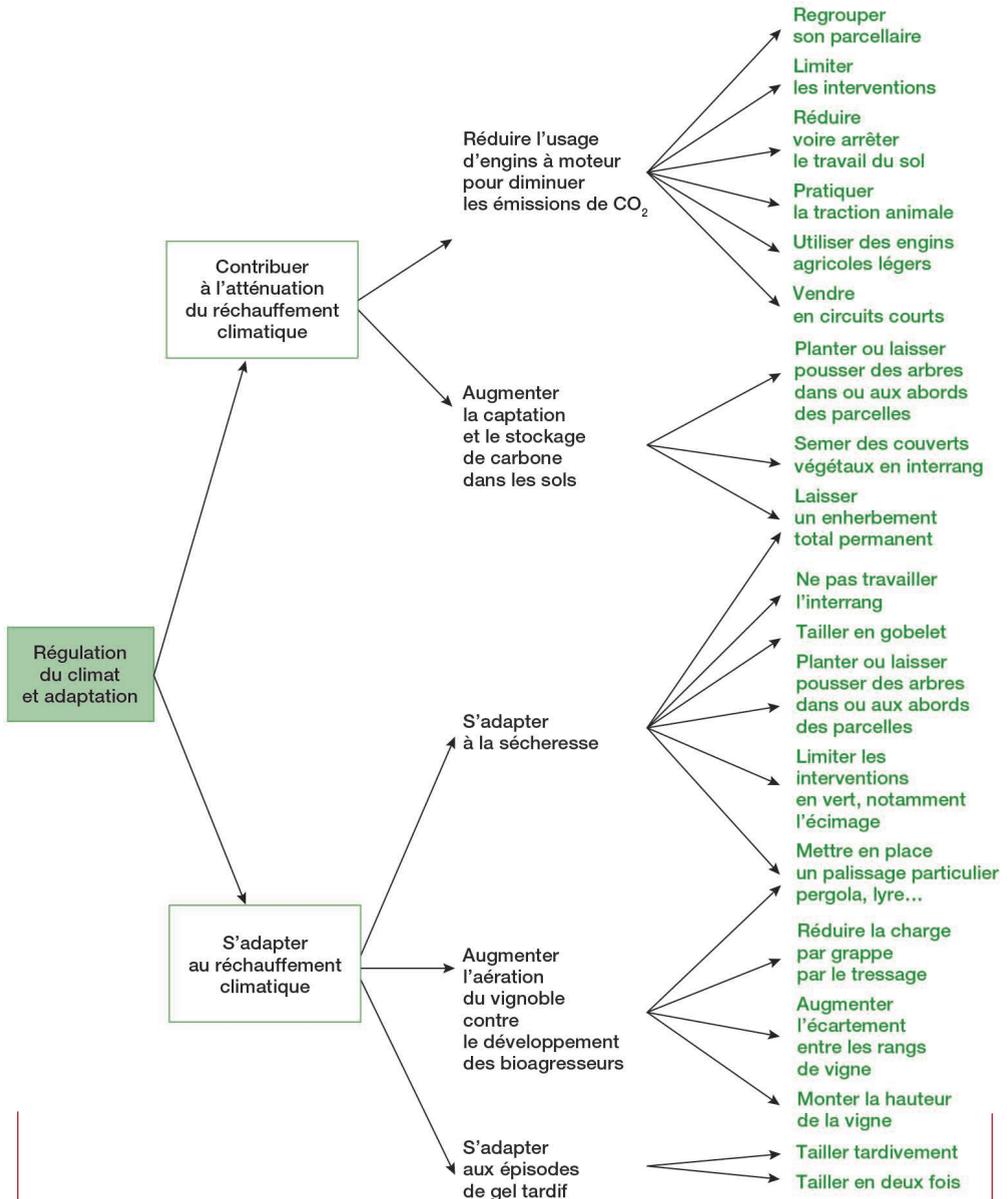


Figure I-6-5. Leviers d'adaptation et d'atténuation mobilisés à l'échelle des parcelles dans des exploitations adoptant les principes de l'agroécologie. Source : Merot *et al.*, 2023; projet CPA PPR VITAE.

Enjeux du mode de conduite pour l'adaptation au changement climatique

Le mode de conduite d'un vignoble détermine la disposition des ceps de vigne dans l'espace (écartement entre les rangs et entre les ceps sur le rang), l'architecture de la structure pérenne (tronc et bras) et la configuration de la canopée. C'est un levier important d'adaptation au changement climatique. Il permet de modifier le microclimat dans la zone des grappes et de réguler la transpiration de la vigne, et ainsi gérer la consommation d'eau.

À travers le monde, les densités de plantation varient de 1 000 à plus de 10 000 ceps par hectare et les systèmes de conduite sont très divers. Des formes aussi diversifiées que la pergola, la vigne en espalier palissé ou le gobelet ont été développées. À chaque endroit, le viticulteur cherche le meilleur compromis entre l'optimisation de la gestion des ressources (température, eau, rayonnement et nutriments), le rendement, le potentiel qualitatif de la récolte et la maîtrise des coûts de production.

Dans un contexte où le climat change, les ressources disponibles ne sont plus les mêmes (pour la plupart des régions viticoles, une augmentation de la température et une diminution de la ressource en eau sont constatées) et il est donc essentiel de faire évoluer les systèmes de conduite. Pour autant, depuis des millénaires, l'homme a déjà mis au point des systèmes de conduite particulièrement résilients à de fortes températures et de faibles disponibilités en eau, comme le gobelet méditerranéen. Ces systèmes doivent être une inspiration pour dessiner les systèmes de conduite du futur (Santesteban, 2020). À ce titre, des pratiques encore plus innovantes telles que l'agroforesterie viticole, la conduite en pergola ou encore la conduite en liane autour d'arbres permettant d'atténuer le bilan radiatif et donc thermique (Favor et Udawatta, 2021 ; Oliva Oller *et al.*, 2022) se développent actuellement, pour adapter la production viticole aux contraintes du changement climatique. Leur mise en œuvre pose de nombreuses questions de conception de systèmes diversifiés, et leur gestion doit s'appuyer sur la caractérisation précise et dynamique des éventuelles concurrences (radiative, hydrique, minérale) que ces systèmes peuvent engendrer.

L'effet de la conduite sur la consommation en eau de la vigne

Le bilan hydrique permet de modéliser la disponibilité en eau pour la vigne au cours de la saison (Lebon *et al.*, 2003). La satisfaction des besoins en eau de la vigne dépend de la réserve en eau du sol en début de saison (réserve utile ou RU, appelée aussi *Total Transpirable Soil Water* ou TTSW), mais aussi des apports, à savoir les précipitations, augmentées éventuellement des apports d'eau par l'irrigation, si elle est pratiquée. Cette satisfaction est aussi tributaire des pertes par la transpiration de la vigne, par le couvert végétal et par l'évaporation à la surface du sol.

La conduite permet de moduler la transpiration d'eau par la canopée. Le rayonnement solaire fournit l'énergie pour le changement de phase (d'eau liquide en eau vapeur) au moment de la transpiration et celle-ci augmente donc avec la quantité de rayonnement intercepté par la canopée si l'eau du sol n'est pas limitante. Deux paramètres d'un système de conduite permettent de jouer sur l'interception du rayonnement : l'écartement entre

les rangs et la hauteur de la canopée. Ces paramètres sont intégrés dans le bilan hydrique et il est possible de faire des simulations sur la satisfaction des besoins en eau de la vigne, pour différents écartements entre les rangs et différentes hauteurs de la canopée. La réalisation du bilan hydrique permet de connaître la *Fraction of Transpirable Soil Water* (FTSW), qui varie de «0», lorsque le sol est complètement asséché, à «1», quand l'humidité du sol est à la capacité au champ (teneur en eau maximale qu'un sol peut retenir). Ce type de simulation a été réalisé pour un système de conduite en espalier palissé avec des écartements de respectivement 2, 3 et 4 m entre les rangs (soit 5000, 3333 et 2500 ceps/ha), pour le climat actuel et futur, dans deux régions viticoles et dans trois sols avec des TTSW de 100, 200 et 300 mm, respectivement (Van Leeuwen *et al.*, 2019). Cette étude montre qu'un plus fort écartement entre les rangs permet d'augmenter considérablement la disponibilité en eau de la vigne pendant les 30 jours avant la récolte (FTSW), en particulier pour les sols à forte réserve en eau (fig. I-6-6). Cependant, dans le scénario le plus extrême (Avignon Côtes du Rhône, sol à TTSW de 100 mm, climat du futur), une augmentation de l'écartement entre les rangs de 2 à 4 m ne permet plus d'augmenter les réserves en eau en fin de saison.

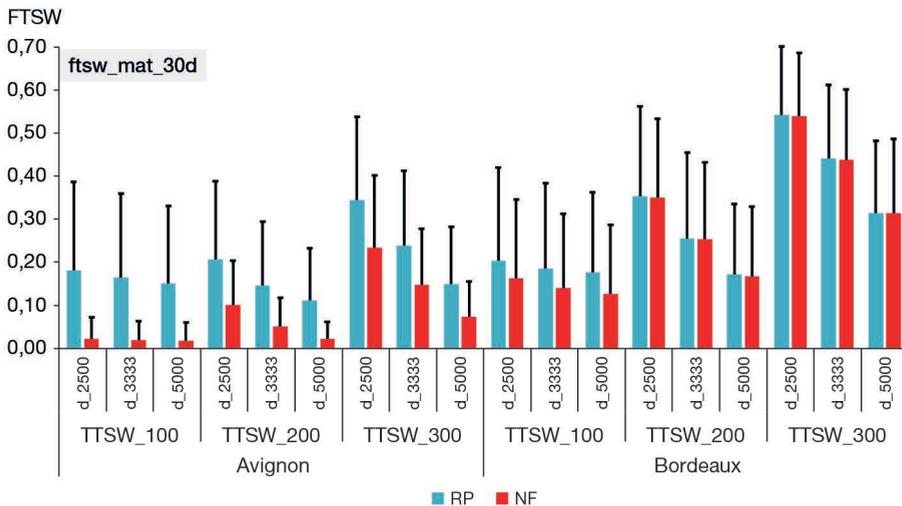


Figure I-6-6. Disponibilité en eau du sol moyen (FTSW) pendant les 30 jours avant la récolte pour deux régions (Bordeaux et Avignon, Côtes du Rhône sud), trois valeurs de TTSW (100, 200 et 300 mm) et trois densités (2500, 3333 et 5000 ceps/ha). RP = passé récent; NF = futur proche. D'après Van Leeuwen *et al.*, 2019.

De même, une diminution de la hauteur de la canopée permet de réduire la consommation d'eau de la vigne et de maintenir une plus grande disponibilité en eau dans le sol en fin de saison. Ces résultats justifient l'existence de systèmes de conduite à forte densité de plantation (associés à un rapport « hauteur de la canopée / écartement entre les rangs » élevé), dans des régions où la disponibilité en eau n'est historiquement pas un facteur limitant (Bordeaux, Champagne, Bourgogne), alors que les densités ont toujours été plus faibles dans des régions sèches de l'arc méditerranéen. Pour s'adapter à une intensification de la contrainte hydrique dans toutes les régions, il est possible à court terme de réduire la hauteur de rognage et à long terme d'augmenter la distance entre les rangs. Pour les systèmes de conduite en espalier palissé, l'augmentation des

écartements entre les rangs permet de réduire la transpiration (par unité de surface au sol) et donc d'économiser de l'eau. En même temps, elle permet d'incrémenter un peu la vigueur de la vigne, ce qui permet l'ombrage des grappes. La plus faible densité qui en résulte diminue à la fois les coûts de production et le rendement. L'opération est profitable pour des productions à faible valeur ajoutée, mais l'effet négatif de la diminution du rendement l'emporte sur l'effet positif de la diminution des coûts pour des productions à forte valeur ajoutée (Van Leeuwen *et al.*, 2019).

L'effet de la conduite sur le microclimat de la végétation et des raisins

Le système de conduite a également une forte influence sur le microclimat de la végétation et de la zone des grappes (Smart et Robinson, 1991). Les vignes à faible densité de plantation ont tendance à être plus vigoureuses, en particulier quand le sol est fertile ou quand l'irrigation est pratiquée. Dans ces conditions, on observe une plus forte proportion de feuilles et de grappes intérieures (non exposées au soleil), plus fraîches et peu éclairées (Smart, 1985). Dans des climats frais, cela peut conduire à la production de vins herbacés (Archer et Strauss, 1985) et à un risque plus élevé de maladies cryptogamiques, mais sous des climats chauds et très ensoleillés, l'ombrage des grappes limite les risques d'échaudage et l'apparition d'arômes de fruits cuits et de pruneau oxydé (Van Leeuwen *et al.*, 2022a).

Le port de la vigne modifie également le microclimat autour des grappes : les grappes sont relativement bien exposées au rayonnement dans des vignes conduites en espalier palissé (surtout à moyenne et forte densités de plantation), alors que les grappes sont plus ombragées dans des conduites à port libre, en pergola ou en gobelet, ce qui rend ces dernières plus adaptées à des climats chauds.

La hauteur du tronc et le mode d'entretien du sol ont aussi un effet sur le microclimat de la grappe. De Rességuier *et al.* (2023) ont montré qu'une élévation de la hauteur du tronc permet d'augmenter les températures minimales dans la zone des grappes (et donc limiter le risque de gel) et de diminuer les températures maximales. Ce gradient est plus important lorsque le sol est enherbé (fig. 1-6-7). Mais, en valeur absolue, les températures minimales sont plus basses dans des vignes enherbées et les températures maximales y sont plus élevées. Les vignes non enherbées et à tronc haut ont donc un régime thermique plus favorable dans la zone des grappes, avec moins de risques de gel, d'échaudage et d'apparition d'arômes de fruits cuits.

Adaptation des pratiques annuelles et réponse au changement climatique

Le changement climatique provoque régulièrement un avancement de la date de la dernière gelée de printemps. Cependant, il n'en résulte pas nécessairement une diminution du risque de gel, car, dans le même temps, le débourrement de la vigne est aussi plus précoce, ce qui accroît la période d'exposition de la vigne au risque de gel. Sgubin *et al.* (2018) montrent que le risque augmentera dans l'est de la France, qu'il diminuera dans le sud et qu'il restera stable à l'ouest pour une majorité de simulations climatiques. Ce type de prévisions est cependant entouré d'un fort niveau d'incertitude (Bois *et al.*, 2023). Un des moyens de limiter le risque de gel est de retarder le débourrement par une taille tardive. Une taille au stade « pointe verte » (stade C

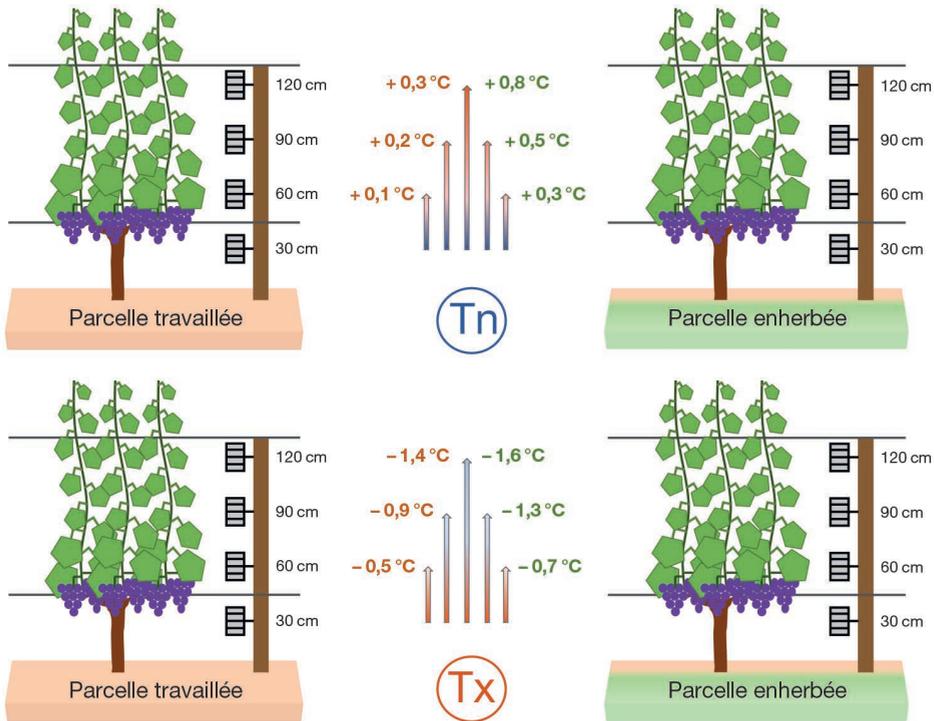


Figure I-6-7. Moyenne de la différence des températures journalières entre les différentes hauteurs sur les températures minimales (Tn) et maximales (Tx), en fonction de l'entretien du sol, durant les journées avec des températures extrêmes. D'après de Rességuier et al., 2023.

de Baggiolini) peut retarder le débourrement des bourgeons laissés à la taille d'une dizaine de jours. Des dates de taille plus tardives décalent davantage le débourrement, diminuent potentiellement la teneur en sucres à maturité, mais avec d'importantes conséquences négatives sur le rendement (Zheng et al., 2017 ; Previtali et al., 2022). La faisabilité d'une taille tardive à l'échelle d'une propriété doit être évaluée, et peut-être réservée aux zones les plus gélives.

L'effet majeur, et déjà observable dans la plupart des vignobles, du changement climatique sur la composition des raisins est l'augmentation de la teneur en sucres à maturité (cf. chapitre I-3). De nombreuses pratiques sont expérimentées pour ralentir cette accumulation des sucres dans les raisins. Récemment, Previtali et ses collaborateurs (2022) ont publié une synthèse très complète des résultats de ces expérimentations rapportées dans 43 études différentes, sous la forme d'une méta-analyse des données. Ils ont pu ainsi mettre en évidence que l'utilisation d'antitranspirants pouvait réduire la teneur en sucres à maturité d'environ 1° Brix et avec encore plus d'efficacité lorsque deux applications successives sont réalisées avant véraison. Comme mentionné ci-dessus, une taille tardive peut être efficace, mais surtout pour des vignes où le rendement est faible. Enfin, une réduction du rapport surface foliaire / poids de récolte par un rognage ou un effeuillage apical post-véraison permet de diminuer la teneur en sucres des raisins dans des vignes à fort rendement, mais surtout pour des cépages rouges tardifs. Dans tous les cas, de nombreux facteurs comme le cépage ou les conditions climatiques de l'année

interfèrent pour moduler l'efficacité de ces pratiques. Les conséquences sur les autres composantes de la qualité des raisins, comme les composés phénoliques, peuvent être non négligeables (Van Leeuwen *et al.*, 2019).

Les principaux systèmes de conduite de la vigne

Les principaux systèmes de conduite utilisés en France sont l'espalier monoplan à différentes densités de plantation et le gobelet. Les études sur des vignes à double plan de palissage, comme la lyre, ont permis de tirer quelques enseignements intéressants, même si leur développement est resté très limité en France.

L'espalier monoplan

En France, la vigne est le plus souvent conduite en espalier palissé (monoplan). Dans ce cas, elle est plantée en rangs et la végétation est palissée à l'aide de piquets et de fils de fer (fig. 1-6-8A). La distance entre les cep sur le rang est souvent proche d'un mètre. Dans ce système, l'écartement entre les rangs est très variable (d'un à quatre mètres) et détermine la consommation en eau, le microclimat de la végétation et des grappes, le rendement et les coûts de production (Van Leeuwen *et al.*, 2019). Le système est facilement mécanisable et présente de nombreuses possibilités de modulation, en faisant varier la distance entre les rangs, la hauteur du tronc et celle de la canopée.

Le gobelet

La vigne en gobelet avec une densité moyennement faible (2500 à 4500 cep/ha) est l'archétype du vignoble méditerranéen (fig. 1-6-8B). Ce système de conduite est très bien adapté à des climats secs et chauds. Il est alors possible de cultiver la vigne sans irrigation sous des climats avec une pluviosité supérieure à 350 mm/an et de produire une récolte de grande qualité. L'année 2019 fut un excellent millésime à Châteauneuf-du-Pape, où ce système de conduite est très répandu, et pourtant on n'a compté que 221 mm de précipitations entre le 1^{er} janvier et le 30 septembre, et l'été fut ponctué de vagues de chaleur très intenses (Van Leeuwen *et al.*, 2022b). L'inconvénient de ce système de conduite est une productivité relativement faible et une impossibilité de mécaniser la récolte (Deloire *et al.*, 2022). Hormis la récolte, obligatoirement manuelle, ce système a en revanche de très faibles coûts de production, car il n'y a pas de palissage à mettre en place et à entretenir, pas d'opérations de pliage ni de levage à effectuer, et le sol peut être entretenu facilement par des griffages croisés (Roby *et al.*, 2008). Le gobelet est sans aucun doute le système de conduite le mieux adapté à un climat qui se réchauffe et qui devient plus sec. Il est regrettable que de nombreuses vignes en gobelet soient arrachées à cause de l'impossibilité de mécaniser la récolte. La mise au point d'une machine à vendanger pour ce système de conduite devrait être la priorité des instituts techniques travaillant sur l'adaptation de la vigne au changement climatique.

Les systèmes de conduite à doubles plans de palissage

Pour concilier un écartement large entre les rangs, destiné à faciliter la mécanisation et une bonne interception du rayonnement, dans l'optique d'une optimisation des

performances qualitatives et quantitatives (en termes de rendement), des systèmes de conduite à double plan de palissage ont été mis au point (Smart et Robinson, 1991; Reynolds et Van den Heuvel, 2009). Ces systèmes sont favorables à une bonne maturation du raisin, même si le rendement est assez élevé, mais ont pour inconvénient une forte consommation d'eau. Le double plan de la canopée peut être soit horizontal (forme de la lyre, fig. I-6-8C), soit vertical (avec une partie de la végétation qui pousse vers le haut et l'autre partie qui pousse vers le bas, comme c'est le cas pour les systèmes Scott-Henri et Smart-Dyson; fig. I-6-8D). Le système en lyre ne s'est jamais imposé en France à cause de la difficulté de mécaniser la récolte. Des essais sont en cours dans les Côtes de Gascogne avec le système Scott-Henri. Les études sur ces systèmes de conduite à double plan de palissage montrent de bonnes performances en termes de rendement et qualité des produits. Cela montre que, dans la configuration des systèmes de conduite, le facteur clé qui doit être optimisé est l'interception du rayonnement (et pas le nombre de ceps à l'hectare), sauf si la disponibilité en eau est un facteur limitant.



Figure I-6-8. Différents modes de palissage de la vigne. A : en espalier palissé monoplan; B : en gobelet; C : en lyre; D : double plan vertical (Scott-Henri). © Jean-Pascal Tandonnet, INRAE (A, C); Laure de Rességuier, Bordeaux Sciences Agro (B); Thierry Dufourcq, IFV Sud-Ouest (D).

Conclusion

Atténuation des effets ou adaptation, l'ensemble des pratiques de modes de conduite et de gestion du sol évoluent dans le contexte du changement climatique et constituent des leviers intéressants pour la durabilité de la viticulture, que ce soit sur les plans environnemental, social et économique (Poni *et al.*, 2023). Le raisonnement de ces pratiques doit intégrer les contraintes pédoclimatiques, les objectifs et moyens de production de chaque vignoble et les particularités de chaque millésime. Certaines pratiques viticoles peuvent représenter de véritables leviers d'adaptation au changement climatique (comme l'agroforesterie et la pratique des couverts végétaux, encadré I-6-2) et être combinées pour réduire la vulnérabilité des vignobles, notamment vis-à-vis de la contrainte hydrique (Romero *et al.*, 2022). Leur mise en œuvre doit être cohérente à l'échelle du système viticole et des services attendus par le producteur, en particulier en termes de production.

Encadré I-6-2. Comment les pratiques de viticulture biologique peuvent-elles atténuer les effets du changement climatique ?

Les pratiques de l'agriculture biologique ont pour objectif principal de réduire l'impact environnemental des cultures en limitant l'utilisation d'intrants polluants, tels que les pesticides et les engrais de synthèse. Elles visent à favoriser la biodiversité et les interactions biotiques favorables à la santé des espèces cultivées, ainsi qu'à limiter la dégradation des sols (fig. I-6-9). Cependant, les données qui permettent d'évaluer leur potentiel dans le contexte du changement climatique sont particulièrement rares.

En réduisant l'usage d'intrants, elles concourent à limiter les émissions de CO₂ associées à la production de ces molécules, mais reposent sur plus d'interventions mécanisées consommatrices d'énergie fossile. Le bilan peut dépendre de nombreux paramètres, dont le nombre de passages et la puissance des machines utilisées (Tissot *et al.*, 2021). Une étude récente menée en Italie sur 25 domaines viticoles ne permet pas de mettre en évidence des différences significatives entre pratiques conventionnelles et biologiques pour l'ensemble des opérations de production des raisins (Ghiglieno *et al.*, 2023). D'autres auteurs rapportent une possible réduction de l'émission de N₂O en viticulture biologique (Döring *et al.*, 2020). Les pratiques durables d'entretien des sols doivent avoir comme objectif de minimiser l'érosion et la compaction, d'augmenter la teneur en carbone et en matière organique source de nutriments et de favoriser les processus biotiques dans ce compartiment, le tout avec un effet positif sur la disponibilité en eau du sol et le volume exploré par les racines (Romero *et al.*, 2022). Un exercice de modélisation a cependant montré que si les couverts végétaux pouvaient contribuer à la neutralité carbone dans les vignobles dans le futur, des mesures additionnelles seraient nécessaires pour qu'ils deviennent de véritables puits de carbone (Schultz, 2022). Il est en effet important de tenir compte de l'augmentation de la température des sols (en même temps que celle de l'air) et des changements de leur état hydrique, qui réduisent les capacités de stockage à long terme. Les effets bénéfiques de l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique sur les rendements pourraient contrebalancer les effets négatifs des pratiques de la viticulture biologique sur la productivité (Döring *et al.*, 2021).

Les variétés résistantes au mildiou et à l'oïdium, qui permettent de réduire jusqu'à 80 % les applications de fongicides, devront présenter aussi des caractères de tardiveté et



•••

de résistance à la sécheresse et aux fortes températures pour répondre aux enjeux du changement climatique. Le porte-greffe peut également contribuer à combiner pratiques respectueuses de l'environnement et adaptation aux conditions climatiques futures (Ollat *et al.*, 2022).



Figure I-6-9. Couverts végétaux semis dans un vignoble à Bordeaux. © Nathalie Ollat, INRAE.

LA GESTION DE L'EAU

*Thierry Simonneau, Cornelis Van Leeuwen, Guillaume Coulouma,
Nicolas Saurin, Isabelle La Jeunesse et Nathalie Ollat*

Introduction

Avec la hausse des températures, l'évapotranspiration va continuer d'augmenter jusqu'à dépasser les capacités de recharge en eau des sols par les pluies, notamment l'été. Des épisodes de déficit hydrique plus ou moins longs vont s'ensuivre, de plus en plus intenses et fréquents, durant lesquels l'eau du sol deviendra de moins en moins disponible. Pour y faire face, le vigneron va devoir adapter ses choix et ses pratiques. Plusieurs travaux conduits au cours du projet Laccave ont permis d'explorer des solutions variées dans une perspective d'économie d'eau et de production durable.

La question n'est toutefois pas tout à fait nouvelle en viticulture. D'une part, certains vigneron recherchent depuis longtemps les effets bénéfiques d'une contrainte hydrique modérée, effets bien connus sur la qualité des vins, notamment les rouges. Cela explique par exemple que certains vignobles aient été installés sur des sols peu profonds ou caillouteux, avec une faible capacité de stockage d'eau, pour permettre le développement d'un certain niveau de déficit hydrique en fin de cycle. D'autre part, les fortes variations climatiques interannuelles ont déjà exposé les vignobles à des années exceptionnellement sèches et chaudes. Il est donc intéressant d'examiner comment les vigneron se sont adaptés à ces situations pour tamponner l'impact des années les plus sèches et chaudes, et quelles solutions nouvelles émergent.

On dispose également d'un référentiel bibliographique qui précise les impacts positifs et négatifs d'une contrainte hydrique (chapitre 1-3). L'ensemble permet d'affiner la notion de parcours hydrique idéal, défini comme l'évolution idéale de la disponibilité de l'eau du sol au cours du cycle permettant d'atteindre des objectifs de production donnés.

Pour suivre ce parcours hydrique idéal dans un contexte pédoclimatique imposé, mais soumis à imprévus, le vigneron peut d'un côté ajuster ses objectifs de production tout au long de la vie de la parcelle et/ou adopter des systèmes de conduite économes en eau. D'un autre côté, il peut augmenter l'offre en eau avec une gestion du sol adaptée. Enfin, quand les apports par irrigation sont possibles, il importe de choisir des techniques fiables, économes en eau et ajustées à l'objectif de production. Différents leviers sont donc actionnables, aussi bien à la plantation que sur la vigne plantée, avec des conséquences plus ou moins immédiates, réversibles ou durables. Ce chapitre offre un éclairage sur la complexité des raisonnements et passe les différents leviers en revue. Il présente également les difficultés de mise en œuvre dans un contexte règlementé, très disparate et où la compétition pour l'usage doit être raisonnée de manière systémique, sur de longs pas de temps, au sein de paysages complexes et multiacteurs.

Le matériel végétal

Le matériel végétal est un levier puissant pour s'adapter au changement climatique (cf. chapitre I-5), notamment vis-à-vis de la contrainte hydrique, car c'est une solution de long terme dont l'impact environnemental peut être considéré comme neutre ou positif. Il permet *a minima* de limiter l'empreinte « eau » de l'activité viticole. La combinaison porte-greffe/greffon détermine la capacité de la plante à extraire de l'eau du milieu, mais aussi à réguler les pertes par transpiration. Cette combinaison doit donc être choisie avec soin. Outre les difficultés d'observation au vignoble, il est compliqué d'identifier un caractère unique qui expliquerait le comportement d'un génotype, qu'il s'agisse du porte-greffe ou du greffon, vis-à-vis de la contrainte hydrique. Gambetta *et al.* (2020) proposent plutôt de combiner quatre caractéristiques physiologiques dans un critère appelé *stress distance* : la transpiration maximale, la capacité de la plante à limiter sa transpiration grâce à la fermeture des pores stomatiques situés à la surface des feuilles, le niveau critique de déshydratation de la feuille en dessous duquel elle perd sa turgescence et le volume racinaire. La variabilité génétique offre un vivier pour faire varier ces caractéristiques, que ce soit avec le porte-greffe, avec le greffon ou encore avec la variation clonale au sein d'une même variété.

Les porte-greffes contribuent à l'adaptation à la sécheresse des variétés auxquelles ils sont associés (Ollat *et al.*, 2016). Les hybrides Rupestris × Berlandieri (110R, 140Ru, 1103P) sont considérés comme les plus adaptés et sont déjà fréquemment utilisés dans le sud de la France, où les situations de sécheresse sont plus fréquentes que dans les autres régions viticoles. Il existe à l'étranger des porte-greffes plus tolérants et la plupart des programmes de sélection de nouveaux porte-greffes cherchent à améliorer ce caractère. À Bordeaux, un dispositif expérimental unique avec 55 porte-greffes (dont 25 non encore inscrits en France, voir encadré I-5-2) combinés à 5 variétés a été installé, afin de produire de nouvelles références et d'identifier des porte-greffes qui pourraient être implantés dans des conditions plus extrêmes (Marguerit *et al.*, 2019). L'aptitude des racines à coloniser le sol sur une très grande profondeur, leur capacité de ramification, leur diamètre, la plasticité de leur développement vis-à-vis de la disponibilité en eau, leur capacité d'extraction de l'eau sont des paramètres déterminants vis-à-vis de l'adaptation à des situations où l'eau est faiblement disponible (Marguerit *et al.*, 2012; Ollat, 2014). Mais la nature du sol et les pratiques de plantation interagissent fortement. Le greffage en place (une fois le porte-greffe installé), autrefois largement pratiqué dans les vignobles méditerranéens, pourrait contribuer à une meilleure colonisation du sol. Certains porte-greffes conférant une forte vigueur tolèrent également bien la sécheresse (140Ru, 110R), mais ce lien n'est pas systématique. Le porte-greffe peut aussi agir sur la régulation de la transpiration et l'efficacité d'utilisation de l'eau, c'est-à-dire la quantité de biomasse produite par quantité d'eau consommée (Marguerit *et al.*, 2012).

Il existe une grande variabilité entre cépages concernant leur réponse à la contrainte hydrique. Les compromis entre rendement et composition des raisins sont à considérer (Serrano *et al.*, 2022). Le choix d'une variété tolérante doit se faire en fonction de la valorisation économique de la production (Van Leeuwen *et al.*, 2020), mais aussi du scénario hydrique (contrainte hydrique permanente, épisodique, combinée ou non à

un stress thermique). C'est un choix à long terme, mais le surgreffage est envisageable pour le corriger. Il n'existe malheureusement pas de classification globale du degré de tolérance à la sécheresse des variétés, mais certains cépages méditerranéens sont considérés comme plus tolérants (tableau I-7-1). Il existe une grande diversité entre cépages pour des paramètres physiologiques qui contribuent à la tolérance à la sécheresse, tels que l'efficacité d'utilisation de l'eau (qui peut être estimée simplement par la discrimination isotopique du carbone ; Bota *et al.*, 2016), les caractéristiques stomatiques (Faralli *et al.*, 2022) et hydrauliques des feuilles et des tiges (Lamarque *et al.*, 2023), la régulation stomatique (Dayer *et al.*, 2020 et 2022 ; Plantevin *et al.*, 2022) et la sensibilité à la défoliation (Van Leeuwen, com. pers). Serrano *et al.* (2022) rapportent cependant que des cépages qui maintiennent un rendement élevé et une composition optimale des raisins sous contrainte hydrique n'ont pas l'efficacité de l'utilisation de l'eau (évaluée par la discrimination isotopique du carbone dans les moûts) la plus élevée.

Tableau I-7-1. Exemples de cépages considérés globalement comme plutôt tolérants ou plutôt sensibles à la sécheresse. D'après (1) Champagnol, 1984 ; (2) Dayer *et al.*, 2022 ; (3) Plantevin *et al.*, 2022 ; (4) Serrano *et al.*, 2022 ; (5) Van Leeuwen (com. pers., observations 2022 sur VitAdapt, voir encadré I-5-1) ; (6) Lamarque *et al.*, 2023.

Plutôt tolérants	Plutôt sensibles
Cabernet-Sauvignon (3, 5, 6)	Merlot (3)
Grenache (1, 2, 3, 4, 5)	Tempranillo (3, 4, 5)
Roussane (3, 5)	Syrah (3, 5)
Xynomavro (3)	Viognier (3)
Mourvèdre (3, 4)	Sémillon (2, 3, 5)
Bobal (4)	Forcallat (4)
Garnacha Peluda (4)	Garnacha Tintorera (4)
Marzuela (4)	
Moribel (4)	
Xynisteri (3, 5)	
Cinsault (1)	
Carignan (1, 5)	

Côté clonal, des travaux récents conduits sur le Grenache et le Tempranillo (Mairata *et al.*, 2022 ; Tortosa *et al.*, 2022) rapportent une variabilité importante pour l'efficacité d'utilisation de l'eau entre clones d'un même cépage. Enfin, des études menées en Australie sur de vieilles parcelles de Cabernet-Sauvignon conduites sans irrigation, avec des capacités de stockage d'eau dans le sol variables (Pagay *et al.*, 2022), ont montré que les vignes se développant avec une faible capacité de stockage (sol superficiel) ont acquis une certaine résilience vis-à-vis de la contrainte hydrique. Les descendances clonales de ces vignes ont conservé leur caractère résilient (échanges gazeux, photosynthèse, efficacité de l'eau) lorsqu'elles ont été analysées en pot en situation de contrainte hydrique (Nagahatenna *et al.*, 2022). Ces observations sont très prometteuses, car elles traduisent que la vigne est dotée d'une capacité d'acclimatation et de mémorisation du stress hydrique *via* des processus épigénétiques, dits de *priming*.

La préparation et l'entretien du sol

L'implantation du vignoble et l'entretien des sols regroupent un ensemble de pratiques qui sont autant de choix déterminants pour le transfert et le stockage de l'eau dans les sols. Or, la généralisation de la mécanisation des opérations culturales, le désherbage chimique et la diminution de la gestion de la matière organique dans les sols viticoles ont entraîné de fait une évolution (souvent défavorable) de leurs caractéristiques, en modifiant entre autres les propriétés de stockage d'eau. En premier lieu, la structure de la surface du sol conditionne sa capacité à absorber une pluie, en diminuant d'autant les pertes par ruissellement (fig. I-7-1). L'infiltrabilité est cette propriété qui règle le partage entre infiltration et ruissellement. En lien avec le changement climatique, une bonne infiltrabilité est particulièrement importante compte tenu de l'augmentation des épisodes de pluie intense entraînant un ruissellement accru. Sans une bonne infiltration de l'eau, l'augmentation de l'évapotranspiration avec le réchauffement planétaire, voire la diminution du cumul de pluie, auront des conséquences encore plus marquées sur la production. Les pratiques de préparation du sol avant plantation et d'entretien du sol sur les vignes en place sont donc un levier important pour préparer le vignoble à ces changements.

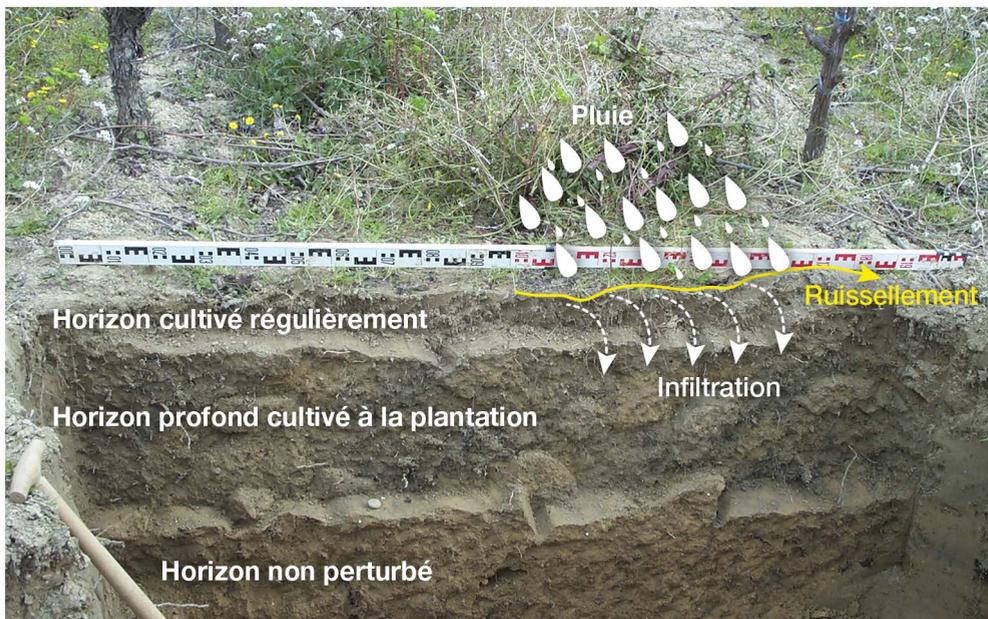


Figure I-7-1. Profil culturel sous vignoble illustrant les compartiments essentiels au transfert et au stockage de l'eau. © Guillaume Coulouma, INRAE.

Façonner le réservoir en eau du sol à la plantation

La réserve utile en eau (RU) d'un sol viticole dépend principalement de la profondeur de sol accessible par les racines. Elle correspond généralement à la profondeur de sol, mais peut être limitée également par des discontinuités (par ex. semelle de plantation) ou des horizons impropres à la pénétration des racines (par ex. pauvres en oxygène à

certaines périodes). La RU dépend en outre de la capacité de rétention en eau par le sol. Cette dernière est tributaire de caractéristiques intrinsèques stables comme la texture, mais aussi d'autres caractéristiques plus variables (état structural, teneur en matières organiques) qui peuvent être modifiées par les opérations culturales. En particulier, lors de la préparation à l'implantation d'un vignoble, plusieurs pratiques peuvent impacter significativement la RU. Les opérations de défoncement au monosoc (profondeur de travail de 70 cm) et le rippage (profondeur 1 m) permettent d'augmenter la profondeur d'enracinement dans les sols de profondeur moyenne (cas fréquent pour les sols viticoles) et peuvent ainsi augmenter la RU (fig. I-7-2). En revanche, le monosoc constitue un risque de dégradation structurale important, entraînant une diminution de la RU et une perturbation de l'enracinement des jeunes plants de vigne jusqu'à une détérioration du fonctionnement du sol. Il provoque également dans les sols superficiels une dilution de la matière organique par mélange de propriétés minérales de la roche sous-jacente, qui contribue à la diminution de la RU (Coulouma *et al.*, 2006).



Figure I-7-2. Opération de préparation du sol au monosoc avant plantation d'un nouveau vignoble.
© Guillaume Coulouma, INRAE.

Limiter le ruissellement et favoriser l'infiltration de l'eau sur le vignoble en place

La recharge de la RU est directement liée aux opérations culturales d'entretien du sol sur la vigne en place. De nombreuses expérimentations en conditions réelles à la placette, à la parcelle et sur bassin versant ont montré qu'un couvert végétal entraîne une infiltrabilité importante et régulière, qui permet à des pluies modérées (inférieures à 20 mm/h) de s'infiltrer et limite par conséquent le ruissellement (Molénat *et al.*, 2021 ; Alletto *et al.*, 2022). Un travail du sol préalable à un événement de pluie permet également d'avoir une infiltrabilité importante. En revanche, cette infiltrabilité diminue rapidement au cours de l'évènement de pluie et des évènements postérieurs, par la mise en place progressive d'une croûte structurale qui peut atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur (Pare *et al.*, 2011). L'importance de cette croûte et la capacité d'infiltration de l'horizon de travail

superficiel du sol (entre 0 et 15cm généralement) dépend fortement de la teneur en matière organique (fig. I-7-3). Un amendement organique important, en complément d'un enherbement naturel ou semé, est un levier majeur pour augmenter la recharge en eau du sol et limiter le ruissellement responsable entre autres de l'érosion progressive des sols viticoles. L'enherbement doit cependant être géré de telle sorte qu'il n'entre pas en compétition pour l'eau en période estivale.

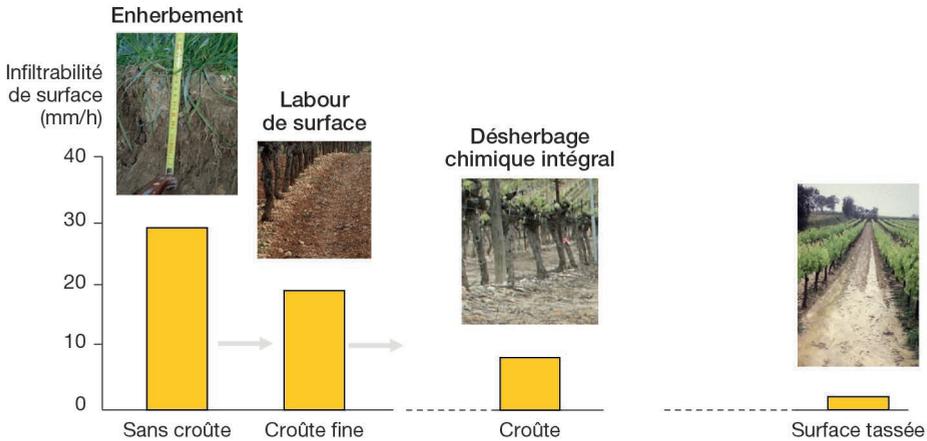


Figure I-7-3. Relation entre l'infiltrabilité de surface et les opérations d'entretien classique du sol.

Les systèmes de conduite

Le système de conduite d'un vignoble se caractérise par la disposition des ceps de vigne dans l'espace (écartement entre les rangs et entre ceps sur le rang), l'architecture de la structure pérenne (tronc et bras) et la conduite de la canopée. Il influence fortement la consommation d'eau de la vigne, car il détermine l'allocation des réserves en eau du sol à chaque cep de vigne, en fonction de la proportion d'ensoleillement capté par la végétation et de la proportion de végétation exposée au rayonnement. Il peut, à ce titre, être un levier d'adaptation important à la disponibilité des ressources en eau.

La densité de plantation détermine la surface au sol disponible pour chaque cep de vigne : à 10 000 ceps/ha, chaque vigne dispose de l'équivalent de 1 m² au sol, alors qu'à 2 500 ceps/ha cette surface est de 4 m² au sol. Lorsque la densité de plantation est réduite, et en supposant une profondeur d'enracinement inchangée, le volume de terre exploré par chaque cep de vigne est plus grand, ce qui augmente d'autant la réserve en eau disponible. D'après Champagnol (1984), les racines d'un cep de vigne arrivent à explorer 10 m² de surface dans un sol fertile et 4 m² dans un sol peu fertile. Comme les densités de plantation en dessous de 2 500 ceps/ha sont rares, la colonisation du sol par le système racinaire ne devrait donc pas être un facteur limitant. Quelle que soit la densité de plantation, il faudra particulièrement soigner l'étape de plantation pour favoriser un enracinement profond, avec un travail adapté de préparation du sol (une taille courte des racines (4-5cm) à la plantation, surtout si cette dernière est effectuée à la machine (Protet *et al.*, 2022), et en limitant au maximum la production de raisins pendant les deux à trois premières années (Champagnol, 1984).

Le système de conduite est également déterminant pour l'interception du rayonnement, qui fournit l'énergie nécessaire au changement de phase de l'eau (de liquide à vapeur) au moment de la transpiration. L'écartement entre les rangs va moduler cette interception du rayonnement (Smart, 1973). Lorsque cet écartement est faible (par ex. un mètre), la quasi-totalité du rayonnement est interceptée par la végétation (autrement dit, les pertes de rayonnement au sol sont minimales). Cela augmente la transpiration de la vigne par unité de surface de sol et donc sa consommation en eau. Lorsque les rangs sont plus écartés, la vigne consomme moins d'eau par unité de surface de sol (Van Leeuwen *et al.*, 2019). Cet effet est aussi constaté sur d'autres cultures. Dans les régions sèches, les arbres fruitiers sont plantés à de plus faibles densités (pour l'olivier, voir Guerfel *et al.*, 2010) et les forestiers constatent une plus faible consommation d'eau quand les forêts sont éclaircies (Gyenge *et al.*, 2011 ; Giuggiola *et al.*, 2012). Un autre facteur qui intervient dans l'interception du rayonnement de la vigne est la hauteur de la canopée. On peut modéliser l'effet de l'écartement entre les rangs et de la hauteur de la canopée sur la consommation en eau de la vigne (Lebon *et al.*, 2003), afin de l'intégrer dans le bilan hydrique et d'en évaluer l'impact. Ces aspects ont été développés dans le chapitre I-6.

Il est intéressant d'observer que, dans le bassin méditerranéen, où les producteurs ont été de tout temps confrontés à une faible disponibilité en eau, des systèmes de conduite particuliers ont émergé (Santesteban, 2020). Le plus connu est le gobelet : les surfaces plantées selon ce mode sont en déclin mais restent importantes (Deloire *et al.*, 2022). Il est surprenant qu'aucune étude sérieuse n'ait été consacrée aux mécanismes qui peuvent expliquer la très forte résistance à la sécheresse de ces vignes en gobelet (à de nombreux endroits, elles produisent du vin de très bonne qualité, sans irrigation et avec des précipitations annuelles inférieures à 400 mm). Il est probable que ce soit lié à une faible interception du rayonnement par unité de surface au sol, car les gobelets sont presque toujours conduits à des densités relativement faibles (2500 à 3000 cep/ha) en région méditerranéenne. La vigueur racinaire pourrait également expliquer le bon comportement face à la sécheresse des vignes conduites en gobelet à faible densité. Une conséquence de ces faibles densités de plantation est toutefois des rendements modérés. Plus anecdotique, il existe un système de conduite très particulier sur l'île volcanique de Santorin, « en panier », qui est également très adapté à la sécheresse (Xyrafis *et al.*, 2021). Dans un contexte de raréfaction des réserves en eau et en considérant les problèmes posés par le partage de l'eau pour l'irrigation, ces systèmes méritent toute notre attention. Il est paradoxal, alors que la vigne est de plus en plus confrontée à la sécheresse, de constater que l'arrachage de vignes se concentre sur ces systèmes de conduite, qui sont les plus résilients à la sécheresse, même s'ils peuvent s'avérer moins productifs.

L'irrigation de la vigne, entre principes et réalité

L'irrigation de la vigne est utilisée depuis très longtemps dans les vignobles dits du Nouveau Monde, où elle y est largement pratiquée. Son adoption dans les régions méditerranéennes (françaises) est beaucoup plus récente et constitue une des adaptations importantes des viticulteurs aux conséquences du changement climatique.

Au niveau mondial, le mode d'irrigation utilisé traditionnellement pour la viticulture a été le mode gravitaire ou par submersion. Beaucoup plus économes en eau, les systèmes

d'irrigation localisée comme le goutte-à-goutte se sont développés depuis le début des années 1990. Dernièrement, ce sont des dispositifs enterrés qui sont déployés. Encore plus économes, ils évitent l'évaporation directe de l'eau apportée et peuvent également permettre une meilleure gestion des adventices, mais ils restent plus onéreux et exigeants en entretien.

Le pilotage de l'irrigation et son usage raisonné reposent d'une part sur la maîtrise d'une technique de caractérisation de l'état hydrique de la vigne, et d'autre part sur une connaissance des réponses de la plante à la contrainte hydrique, en fonction de ses stades phénologiques.

Plusieurs techniques d'estimation de l'état hydrique des plantes ont été proposées pour la vigne (Rienth et Scholasch, 2019). La méthode de référence est la mesure du potentiel hydrique foliaire avec la chambre à pression. D'autres indicateurs liés à l'état hydrique peuvent être mesurés, soit directement sur la plante à l'aide de poromètres portables pour déterminer le niveau d'ouverture des pores stomatiques, ou avec des capteurs de flux de sève installés sur les cepes pour mesurer la transpiration, ou bien par thermométrie infrarouge pour déterminer la température foliaire, ou encore par observation visuelle de l'état de croissance des apex, soit indirectement sur le sol, par exemple avec des tensiomètres pour déterminer la disponibilité en eau dans la zone d'enracinement. Il existe aussi des approches par modélisation du bilan hydrique basées sur une estimation de la réserve utile en eau du sol et de l'évapotranspiration calculée sur la base de données météorologiques. Les estimations peuvent éventuellement être recalées à l'aide de mesures sur la plante (potentiel hydrique de base, mesuré en fin de nuit) ou dans le sol. Le choix de la méthode réside dans un compromis entre différents paramètres tels que le coût, la facilité de mise en œuvre, la pertinence de l'information, la résolution temporelle, la résolution spatiale.

Différents itinéraires hydriques liés à l'objectif de production (jus de raisin, vins blancs, vins rouges, vins de garde...) ont été définis, à partir d'informations scientifiques et empiriques sur l'état hydrique optimal pour la vigne, à chaque étape de son cycle, et à partir de l'intensité de la contrainte hydrique (Ojeda, 2007; Ojeda et Saurin, 2014). Les grands principes peuvent être résumés comme suit :

- en début de cycle végétatif, une bonne alimentation hydrique sans excès favorise la croissance des rameaux;
- autour de la floraison, l'absence de contrainte hydrique permet à la fois de ne pas affecter le taux de nouaison de l'année en cours ni le développement des ébauches d'inflorescence pour l'année suivante;
- avant véraison, pendant la croissance herbacée de la baie, la contrainte hydrique n'affecte pas la division cellulaire, mais réduit le volume potentiel des baies. La diminution contrôlée du volume des baies peut être un objectif de qualité dans le cas d'élaboration de vins rouges de garde;
- après véraison, l'état hydrique détermine en grande partie le type de vin. Au fur et à mesure que les niveaux de contrainte hydrique augmentent, la concentration en composants liés à la qualité (phénols, précurseurs d'arômes, sucres...) augmente, ce qui compense la réduction du rendement qui résulte notamment de la diminution de la taille des baies. Mais il faudra toutefois éviter des contraintes hydriques trop sévères pour préserver les arômes des vins blancs et éviter des vins rouges excessivement tanniques, durs, astringents et alcooleux;
- après récolte et avant la chute des feuilles, la vigne doit récupérer son état hydrique pour favoriser sa photosynthèse et la mise en réserve pour le prochain cycle végétatif.

La stratégie d'irrigation visera à suivre le parcours hydrique optimal lié à l'objectif de production. Pour atteindre un déficit hydrique modéré dans le sol, l'irrigation sera souvent limitée à une fraction seulement de l'évapotranspiration attendue. Il s'agira alors d'une irrigation déficitaire (Chaves *et al.*, 2010). Elle présente également l'avantage d'éviter une perte inutile d'eau par transpiration, qui serait inefficace pour la photosynthèse au-delà d'un certain confort hydrique de la plante (Simonneau, 2023). L'irrigation alternée de chaque côté du rang est une alternative qui a donné des résultats au moins équivalents (Dos Santos *et al.*, 2003), avec la possibilité de gérer différemment les adventices ou l'enherbement d'interrang.

En France, l'irrigation de la vigne de cuve est encadrée réglementairement, notamment pour les vignes destinées à la production de vins bénéficiant d'une AOP. Elle était régie par les décrets 2006-1526 et 1527 du 4/12/2006, complétés par le décret 2017-1327 du 8/09/2017 spécifique aux vignes des aires de production de vins d'appellation d'origine, tous trois repris dans le Code rural et de la pêche maritime (CRPM). Jusqu'en 2023, un des principes forts inscrits dans ces textes est l'interdiction d'irriguer à compter du 15 août (véraison) et jusqu'à la récolte. Le nouveau décret n° 2023-735 du 8/08/2023 remplace la date du 15 août par celle du 15 septembre²⁷.

Au niveau des politiques publiques, certaines contribuent au développement encadré de l'irrigation au vignoble. On peut mentionner l'aide proposée depuis 2008 dans le cadre de l'Organisation commune du marché (OCM) vitivinicole. Le dispositif permet aux viticulteurs de bénéficier d'un accompagnement financier à l'équipement des parcelles en goutte-à-goutte, dans le cadre des aides à la restructuration du vignoble. Cette aide est attribuée par FranceAgriMer sur une base forfaitaire, à hauteur de 800 euros par hectare. Son versement est subordonné à la présentation d'un justificatif d'un droit de prélever dans les ressources en eau ou d'une adhésion à un réseau collectif, un contrôle systématique sur place étant par ailleurs réalisé.

D'après FranceAgriMer, entre 2008 et 2018, plus de 23700ha de vigne ont été équipés d'un système d'irrigation au goutte-à-goutte dans le bassin Languedoc-Roussillon, à partir de l'aide à la restructuration du vignoble. D'après l'AIMRF (Association des irrigants des régions méditerranéennes françaises), en 2017, le bassin Languedoc-Roussillon comptait plus de 32000ha de vigne irriguée, soit environ 14% du vignoble. La vigne y représentait 40% des surfaces irriguées. Si elle est devenue la principale culture irriguée en surface dans cette région, les volumes qu'elle prélève restent modérés au regard d'autres cultures. Si l'on tient compte que les apports ne doivent compenser qu'une partie des pertes (pour rester dans le parcours hydrique idéal), les volumes annuels recommandés sont compris entre 500 et 1 000 m³/ha (50 à 100mm) selon les précipitations de l'année.

Néanmoins, face à la forte demande de création ou d'extension de réseaux, d'autres solutions devront être trouvées. La poursuite de la modernisation des réseaux peut encore permettre d'économiser des volumes. Des solutions alternatives telles que la réutilisation des eaux usées traitées se développent (une centaine d'hectares autour de Narbonne; voir encadré I-7-1). Pour les zones non desservies, des solutions de stockage individuel ou collectif ou de transferts sont à explorer. Si des solutions pour le pilotage d'une irrigation raisonnée existent et sont accessibles au viticulteur, les choix et options qui seront pris sur la gestion de la ressource en eau relèvent quant à eux d'une décision collective et impliquent l'ensemble des acteurs du territoire.

27. <https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=GRqEXBtcolqqdSAistw5ZMkXQ6zD77WWCC2B1aFBUYU>.

Encadré I-7-1. La réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures, une opportunité pour la vigne ?

Dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des besoins en eau d'irrigation, la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) apparaît comme l'une des solutions à développer. Elle est de plus en plus encouragée par les organisations internationales comme la FAO et par l'Europe. En France, la REUT est clairement promue dans les conclusions des Assises de l'eau (2019) et du Varenne de l'eau (2022).

En 2010, on estime que 20 millions d'hectares à travers le monde sont irrigués avec des eaux usées brutes ou diluées, soit environ 10% des terres irriguées. Seuls 500 000 ha sont irrigués avec des eaux usées traitées (EUT). Dans les régions arides et semi-arides, les taux de réutilisation des eaux usées peuvent atteindre 90% (Israël, Jordanie), 25 à 30% dans le Sud méditerranéen, et enfin, plus proche de nous, 14% en Espagne et 8% en Italie. En France, moins de 1% des EUT sont réutilisées. Les expériences les plus anciennes et symboliques sont celles des sites de Noirmoutier (300 ha de pomme de terre) et de Clermont-Ferrand (700 ha de blé, betterave et maïs irrigués depuis 1999).

C'est sur le territoire de la Narbonnaise que les premières initiatives d'irrigation de la vigne ont été lancées par la communauté de communes du Grand Narbonne, il y a plus de 10 ans. Elles ont permis des avancées sur la faisabilité technique et économique. Le démonstrateur de Gruissan, station balnéaire, permet d'irriguer 80 ha, mais doit faire face à des risques de salinité. Le pilote de Roquefort-des-Corbières, petit village de 1 000 habitants, permet d'irriguer 15 à 20 ha au sein d'un vignoble de 600 ha.

Si l'expérience acquise rend envisageable un déploiement plus large sur ce territoire, la réalisation de projets de REUT reste complexe. Les exigences sanitaires et environnementales sont élevées, mais l'évolution du règlement européen devrait assouplir le montage de projets. Ces projets impliquent différentes catégories d'acteurs : collectivité qui détient la compétence assainissement, entreprise en charge de la station d'épuration des eaux usées et du traitement tertiaire, groupement d'irriguants (ASA), société civile. Les attentes et besoins de tout un chacun doivent être clairement définis et partagés dès le départ. Pour supporter les coûts importants d'investissement (traitements supplémentaires, réseaux d'adduction), des approches multi-usages seront à privilégier (nettoyage urbains, arrosage des espaces verts, lutte contre les incendies ou recharge de nappes). Enfin, la REUT n'est qu'une solution parmi d'autres, à combiner avec différents leviers au sein des systèmes de cultures, tels que l'encépagement ou la densité de plantation pour ce qui concerne la vigne.

Intégrer la viticulture à l'espace de gestion de la ressource en eau

L'apport d'eau à la vigne pour lutter contre la sécheresse, mais aussi contre le gel tardif, est aujourd'hui considéré par de nombreux professionnels comme un levier majeur d'adaptation au changement climatique de la viticulture en France (Bertrand *et al.*, 2020; Santillan *et al.*, 2019), avec une demande en forte expansion. Cette demande en eau pour l'usage viticole interroge sur la place que tient la viticulture dans l'espace et sur la gestion temporelle de la ressource en eau.

Tout d'abord, qu'il s'agisse de terroirs viticoles qui ont déjà recours à l'irrigation pour leur production, ou de ceux où cette demande est nouvelle, l'irrigation de la vigne en

réponse au changement climatique contribue à augmenter la pression sur la ressource en eau. Si toute demande d'eau est légitime en tant que telle, elle pose d'abord la question de l'accès à l'eau, qui n'est pas possible sur tout l'espace viticole, puis du partage de la ressource avec d'autres usages, agricoles ou non. En effet, les terroirs viticoles qui souhaitent faire cette demande se confrontent à un espace de décision multi-usage qui est celui de la gestion de la ressource en eau. En Europe, l'échelle de la gestion de l'eau est le bassin versant hydrographique, en application de la directive-cadre européenne sur l'eau (Directive 2000/60/CE[1]). La France compte sept districts métropolitains, réalisant chacun leur schéma directeur d'aménagement et de gestion de l'eau (Sdage), mis à jour tous les six ans. C'est à l'échelle des Sdage que les plans de gestion de l'eau sont proposés. Or, les limites spatiales sont celles des bassins versants des fleuves (fig. I-7-4A) et diffèrent de celles des bassins viticoles (fig. I-7-4B) et des appellations que contiennent ces derniers.

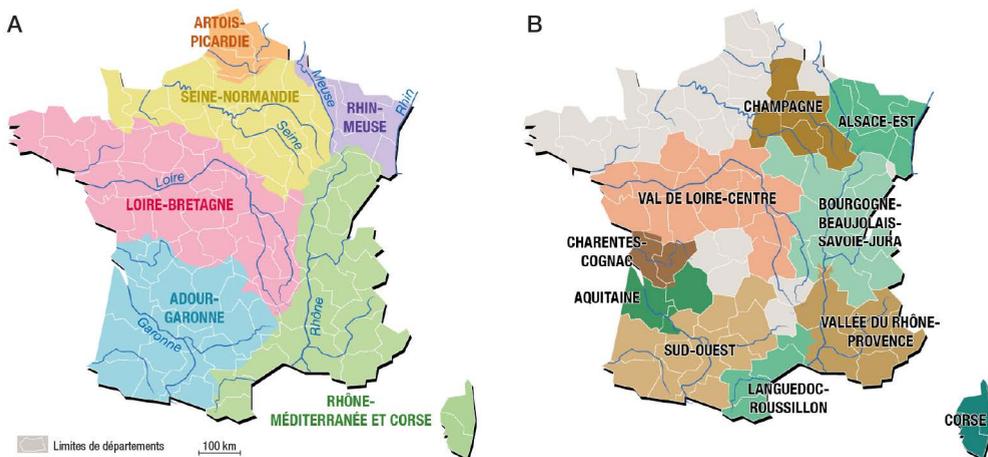


Figure I-7-4. Limites spatiales des districts hydrographiques métropolitains français (A) et des bassins viticoles français (B). Sources : ministère de l'Économie et des Finances. © D. Andrieu, MSH Val de Loire, 2023.

À l'intérieur des périmètres des Sdage, des territoires font une demande d'autorisation de schéma d'aménagement et de gestion de l'eau (Sage), afin de décider d'actions de gestion de l'eau et de la rivière, dans un processus de démarche volontaire de concertation entre acteurs locaux. Tous les usages de l'eau sont représentés dans une commission locale de l'eau (CLE) comprenant aussi des élus. Aujourd'hui, 54% du territoire français sont couverts par un Sage (Gest'eau, 2023). L'historique de l'élaboration de ces Sage montre que la durée moyenne d'élaboration est de neuf ans (Gest'eau, 2023). Ainsi, l'intégration d'un nouvel usage dans un territoire de gestion de l'eau, qu'il se positionne à l'échelle régionale du Sdage ou à une échelle inférieure, ne peut *a priori* se concrétiser sereinement que dans un processus long de dialogue et de concertation. C'est pourquoi il est certain que la place de la viticulture dans l'aménagement du territoire, en lien direct avec la gestion de l'eau, sera très certainement déterminante dans sa possibilité de faire entendre ses besoins nouveaux en eau. Or, cette dimension est souvent peu prise en compte dans la présentation de l'irrigation comme un levier « facile » à mobiliser. Les rivalités d'usage de la ressource en eau (La Jeunesse et Quevauviller, 2016), actuellement exacerbées par des sécheresses sévères sur le territoire français, sont des réalités.

Elles se situent aussi bien entre usages différents (consommation pour la production d'énergie ou le refroidissement de centrales nucléaires, irrigations agricoles, consommations domestiques, maintiens des débits écologiques des cours d'eau, activités de loisirs de nature, etc.) qu'au sein d'un même usage. La question de l'hétérogénéité de l'accès à l'eau dans les terroirs viticoles en raison des possibilités techniques ou de possibilité de financer des infrastructures peut d'ailleurs aussi représenter une source de rivalités. Ces rivalités peuvent également contribuer à de nouvelles causes de relocalisation des vignobles (Thermes et al., 2020).

Dans ces nouvelles dimensions spatiales de demande d'accès à l'eau, la temporalité du besoin de l'eau viticole peut également être différente en fonction de la finalité du besoin. La lutte contre le gel tardif nécessite généralement des quantités d'eau pour l'aspersion lors des gelées du mois d'avril, donc à la fin de la période hydrologique de la recharge en eau. L'irrigation de la vigne, réalisée en goutte à goutte, se concentre, elle, à d'autres périodes de l'année. De plus, à l'heure actuelle, les volumes sont inégaux entre ces deux demandes d'eau et en fonction de la localisation spatiale des vignes, mais nécessitent néanmoins d'être considérés dans leur ensemble pour la gestion de la ressource en eau.

Avant tout, il faut rappeler que jusqu'en 2023 l'irrigation restait interdite pour tous les vins entre le 15 août et la récolte (article D665-17-5 du CRPM). Depuis le 9 août 2023, pour les vins à indication géographique protégée (IGP) et pour les vins sans indication géographique (VSI), l'irrigation est possible après la récolte et jusqu'au 15 septembre. Pour les vignes en AOP dont le cahier des charges intègre la possibilité de déroger à l'interdiction d'irriguer, cette dérogation accordée par l'Inao, en fonction des caractéristiques du millésime et après demande de l'organisme de défense et de gestion (ODG) concerné, permet potentiellement d'irriguer pendant la période d'interdiction, soit entre le 1^{er} mai et le 15 septembre. La période d'irrigation est alors la même que pour les IGP et les VSI. Toutefois, l'Inao n'a pas de commission *ad hoc* pour étudier de façon approfondie les conditions hydrométéorologiques de l'espace de l'appellation qui souscrit la demande et n'a pas de levier à l'échelle des territoires pour obtenir un accès à l'eau. C'est donc bien localement, dans les territoires où s'inscrivent les productions viticoles, que la question de l'accès à l'eau d'irrigation sera posée.

Conclusion

La gestion de l'eau pour la production vitivinicole va devoir fortement évoluer pour faire face au changement climatique. Les solutions sont à composer au cas par cas, en tenant compte des incertitudes climatiques, des nombreuses contraintes qui conditionnent la disponibilité de l'eau et des liens entre les différentes composantes de la filière.

Il faut d'abord rappeler que les prévisions météorologiques à court terme, en particulier les précipitations, restent très incertaines à l'échelle locale de la parcelle. À son niveau, le vigneron doit donc gérer un risque lié à la différence attendue entre, d'un côté, les évolutions de l'offre en eau (précipitations et, éventuellement, irrigation), et de l'autre, les fluctuations des besoins de la plante, eux-mêmes déterminés par l'objectif de production (associé aux choix techniques appropriés) et par les conditions atmosphériques d'évapotranspiration. L'objectif est de maintenir l'évolution de cette différence au plus

près du parcours hydrique idéal évoqué plus haut. Plus la saison avance, plus le risque d'écart au parcours hydrique idéal diminue et les choix tactiques à effet rapide (destruction éventuelle de l'interrang, effeuillage, sans parler de l'irrigation) peuvent permettre d'atteindre les objectifs.

Cependant, avec l'amplification des déficits hydriques estivaux, les risques d'écart avec le parcours hydrique idéal augmentent considérablement. Le vigneron doit donc aussi repenser ses objectifs et opérer des choix stratégiques plus radicaux dès la plantation, en les adaptant au contexte pédoclimatique de chaque parcelle (combinaison porte-greffe/greffon, préparation du sol, densité de plantation, système de taille et de palissage). Lorsque cela est possible, la prise de risque peut être atténuée grâce à une diversification

Encadré I-7-2. Agrivoltaïsme et changement climatique

L'agrivoltaïsme consiste à combiner agriculture et production photovoltaïque d'électricité sur une même surface. Ce partage de la surface entre deux productions différentes peut être considéré comme une variante d'agroforesterie (Dupraz et Liagre, 2008). La production décarbonée d'électricité participe des politiques d'atténuation développées en réponse au changement climatique.

Cette production d'électricité a pour inconvénient majeur d'être très gourmande en surface en l'état actuel de la technologie, avec des perspectives assez limitées d'amélioration du rendement. L'exploitation des surfaces agricoles est donc considérée comme une opportunité pour cette filière. Pour les agriculteurs, cela représente un revenu complémentaire, l'association étant toujours présentée comme donnant la priorité à la production agricole.

Différentes études sur des cultures sous structure de panneaux photovoltaïques ont montré des effets significatifs et sensibles sur la croissance et le développement, la photosynthèse, les flux hydriques, le rendement, le microclimat (Marrou *et al.*, 2013a ; Juillion *et al.*, 2022)... Ces effets sont causés par la réduction du rayonnement solaire incident pour les plantes. On peut parfois observer une augmentation de l'efficacité d'utilisation du rayonnement (Marrou *et al.*, 2013b), ce qui ouvre une vraie perspective d'optimisation de l'association et d'augmentation de la productivité globale rapportée à la surface (Dupraz *et al.*, 2011 ; Édouard *et al.*, 2023).

L'ombrage représente une voie d'adaptation au changement climatique pour la viticulture. L'hypothèse principale est qu'une certaine dose d'ombrage, à préciser, permet de tempérer le microclimat en été, surtout pour les températures excessivement hautes ressenties par le raisin, et de modérer la dégradation des acides organiques et la production de sucres. Le bénéfice attendu est l'amélioration de la qualité technologique, polyphénolique et aromatique du raisin et du vin, si possible sans affecter le rendement, ou en le diminuant légèrement, à un niveau économiquement acceptable. Un bénéfice secondaire pourrait aussi être une relative protection contre les risques de gel de printemps.

L'ombrage peut être adapté de manière assez fine aux différentes phases phénologiques de la vigne correspondant à des besoins ou contraintes différenciés. Les questions de recherche associées sont celles de l'optimisation ou des compromis acceptables, entre réduction du rayonnement intercepté et de la photosynthèse, et microenvironnement plus favorable. Une part de la réduction de photosynthèse peut être compensée à long terme par l'augmentation du CO₂ atmosphérique. De nouveaux équilibres source/puits et une réduction du rayonnement modulée selon les phases phénologiques pourraient se révéler favorables à la production de vins de qualité.

des productions et un assolement raisonné en fonction de la capacité de rétention en eau des sols. Divers systèmes d'ombrières se développent. Ils permettent une économie d'eau, mais restent encore pénalisants pour la production lorsque la contrainte hydrique est modérée (voir encadré I-7-2). Les aménagements parcellaires (murets, talus, orientation des rangs) sont à rechercher pour ralentir le ruissellement et l'érosion. L'ensemble de ces leviers doivent donc être considérés en fonction des spécificités locales.

L'eau et le vin : une vision systémique

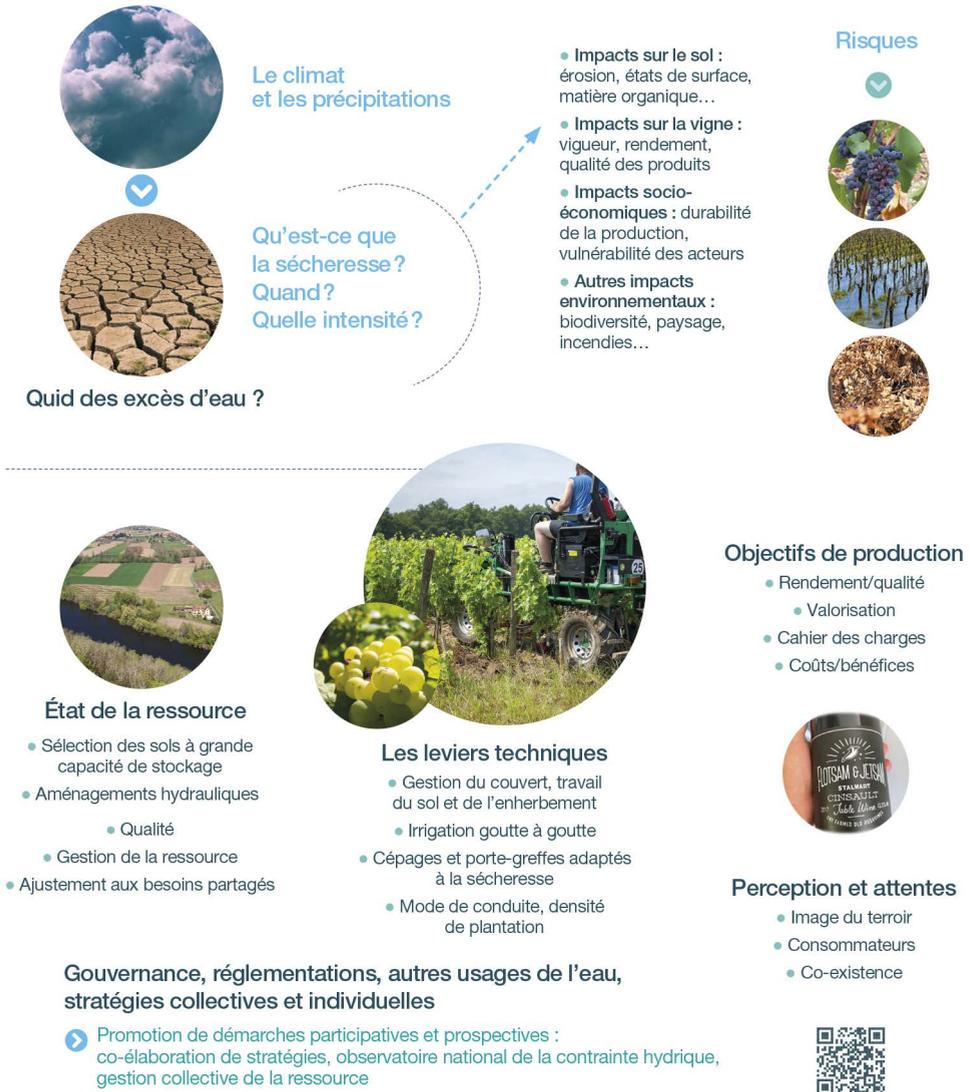


Figure I-7-5. Représentation synthétique de l'ensemble des éléments qui déterminent les choix stratégiques et tactiques pour la gestion de l'eau sur une parcelle viticole. © INRAE.

Mais globalement, le système sera plus résilient, d'une part si l'objectif de production peut être révisé en fonction de l'évolution prévisible de la disponibilité en eau, avec une marge de sécurité qui dépend de la fréquence locale des accidents climatiques, et d'autre part si les choix techniques permettent une gestion adaptative de l'eau aussi bien au niveau des apports que des prélèvements.

Il faut enfin garder en tête que les impacts d'une année sèche et chaude sont à évaluer à plusieurs niveaux de la filière et de son environnement biophysique et socio-économique. Le vigneron n'est donc pas le seul acteur à influencer sur les choix possibles, souvent contraints par la réglementation ou des équilibres socioéconomiques difficiles à remettre en cause (fig. 1-7-5). Ces questions se posent particulièrement dans le cas du recours à l'irrigation. En effet, les impacts négatifs de l'irrigation sur l'environnement et le coût global du prélèvement et de l'acheminement de l'eau sont des éléments clés de l'équation, permettant d'évaluer la durabilité de cette pratique. Les choix vont dépendre fortement de paramètres socioéconomiques, notamment de la perception des consommateurs et de l'équilibre entre les intérêts généraux et ceux du secteur professionnel. Par ailleurs, le levier irrigation ne sera pas envisageable pour toutes les parcelles d'un même vignoble ou pour toutes les exploitations, si bien que la distribution de l'espace viticole lui-même peut être réinterrogée en fonction de la disparité des impacts du réchauffement climatique et de l'accès à l'eau. Il convient donc de promouvoir des approches participatives impliquant toutes les parties prenantes à l'échelle du territoire pour relever ce défi majeur.

LES SOLUTIONS ŒNOLOGIQUES : ADAPTER LA VINIFICATION

*Philippe Darriet, Jean Roch Mouret, Jean-Marie Sablayrolles
et Alain Samson*

Introduction

L'adaptation au changement climatique nécessite des évolutions importantes dans les pratiques viticoles, qui concernent en particulier l'encépagement et le mode de conduite de la vigne. Ces transformations s'inscrivent essentiellement dans le moyen ou long terme.

L'évolution des pratiques œnologiques est un autre élément clé pour envisager des solutions complémentaires applicables à court ou moyen terme. L'objectif est de proposer des stratégies et des outils permettant d'adapter la vinification aux évolutions de composition des raisins. Celles-ci concernent non seulement les teneurs excessives en sucres et les faibles niveaux d'acidité, mais aussi les modifications de concentration de molécules essentielles d'un point de vue organoleptique, telles que les polyphénols ou les composés aromatiques.

Les approches œnologiques et viticoles doivent être menées en synergie, avec deux objectifs possibles, selon les situations : la conservation des principales caractéristiques des vins actuels dans une logique d'appellation d'origine contrôlée ou l'optimisation des potentialités des nouvelles matières premières. Quel que soit l'objectif, il est possible d'intervenir à la fois sur la récolte des raisins et sur leur mode de vinification et d'élevage.

Aménager les modalités de récolte

Dans un contexte de changement climatique, la maturation des raisins risque de se dérouler dans un environnement de températures élevées, et souvent couplées à des contraintes hydriques importantes de la vigne, produisant parfois stress hydrique et défoliation. De tels phénomènes nécessitent une vigilance de la part des vinificateurs, dans la mesure où une richesse en sucres élevée des raisins conduira après fermentation à une teneur élevée en éthanol dans les vins. Éventuellement associé à ces phénomènes, un flétrissement des raisins risque d'être observé ainsi qu'une modification de l'acidité des baies, traduite par une diminution de l'acidité totale et une augmentation du pH. La figure I-8-1 illustre ces évolutions sur les vingt dernières années en Occitanie, à partir d'analyses de vins rouges. Dans d'autres circonstances, dues à des contraintes hydriques trop élevées pour la vigne et assimilées à des stress, un arrêt de maturation des raisins peut être observé. De fait, des adaptations doivent être réalisées en ciblant particulièrement le choix des dates de récolte et des modalités de leur mise en œuvre.

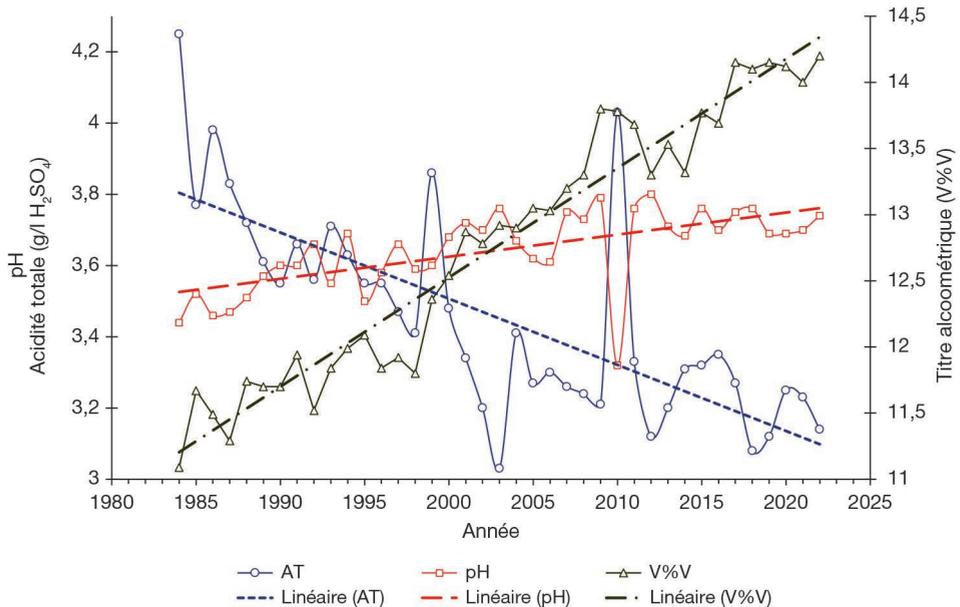


Figure 1-8-1. Évolution de l'acidité totale (AT), du pH et du titre alcoométrique moyen (TA V % vol.), de 1984 à 2022, sur un échantillon annuel de plus de 2 000 vins rouges du Languedoc-Roussillon. Données : laboratoire Dubernet (Narbonne), graphique INRAE Pech Rouge (Gruissan).

Adapter la date des vendanges

De manière générale, la date de la récolte est décidée après des observations au vignoble, des contrôles de maturité et se situe en adéquation avec l'objectif produit recherché. Ainsi, l'évaluation du stade de maturité (ou de surmaturité) des raisins et la prise en compte du style de vin recherché doivent guider le vinificateur, en fonction de son expérience, dans la prise de décision. Le contexte environnemental, lié à l'évolution météorologique et à l'altération de la vendange, peut devenir le premier critère de décision. Aussi, le prélèvement de raisins représentatifs des parcelles considérées, lors de contrôles de maturité, suivi de leurs analyses, va renseigner les paramètres élémentaires (teneur en sucres, acidité). La dégustation de baies (ou d'échantillons représentatifs d'un ensemble de baies), éventuellement associée à l'analyse de la composition phénolique, de la teneur en azote assimilable, de l'acide malique et du potentiel aromatique apportera des informations complémentaires pour la prise de décision. D'ailleurs, un temps de formation à la dégustation des baies sera bénéfique au viticulteur pour lui permettre de mieux discerner les options de vinification.

Dans un contexte de modification de la composition des raisins à maturité, des adaptations seront mises en œuvre, basées sur l'observation des caractéristiques de la vendange au cours de sa maturation. Il pourra s'agir éventuellement d'une récolte à deux dates, l'une des récoltes étant conduite avant maturité complète afin d'obtenir des raisins moins sucrés et plus acides, l'autre récolte se déroulant à maturité complète. Suivant ce protocole, l'assemblage est réalisé après vinification. Sinon, une vendange sélective peut être organisée pour retirer initialement les grappes de raisins flétris avant de récolter manuellement ou mécaniquement le reste de la vendange. Une troisième alternative

consiste à envisager la récolte, à la même date, de raisins de variétés différentes (après expérimentation préalable et selon le contexte réglementaire). Ainsi, des raisins de composition variable (en termes d'acidité, richesse en sucres, composante aromatique ou polyphénolique) pourront constituer, à partir des jus pressés ou des raisins récoltés, une même cuvée en vinification. Ces pratiques seront plus facilement employées pour la vinification de vins blancs secs ou rosés. Toutefois, pour une vinification en rouge, une récolte de raisins avant maturité peut conduire en cours de macération à l'extraction de composés, principalement phénoliques, renforçant les perceptions d'astringence et d'amertume dans les vins. Par ailleurs, des auteurs (Piccardo et al., 2019) se sont penchés sur l'opportunité de la récolte de raisins immatures avant la date habituelle de la récolte dans la cadre d'une vinification de raisins de Pinot noir et de Tannat. Les raisins immatures ont été pressés et les jus conservés à basse température avant de les réintégrer aux raisins récoltés à maturité, préalablement foulés et égouttés. Cette approche expérimentale ponctuelle, dont l'un des résultats est de contribuer à maintenir une acidité suffisante et une teneur en sucres non excessive dans les raisins, doit tout de même être conduite avec vigilance et adaptée selon les cépages. Elle passe nécessairement, et plus spécifiquement pour la vinification de raisins noirs, par la réalisation d'expérimentations. Il est important de noter que les étapes de sélection de la vendange pourront être mises en œuvre lors de la récolte ou par des dispositifs de tri de vendange, incluant le retrait éventuel (partiel ou total) des rafles puis le foulage des raisins. La sélection des raisins en fonction de leur teneur en sucres pourra être conduite par l'usage d'un procédé densimétrique, ou tri densimétrique, dispositif commercialisé, basé sur la sélection des baies éraflées dans une solution sucrée.

Selon les modalités des opérations préfermentaires (c'est-à-dire avant le début des fermentations) et la typologie des vins (blanc sec ou rosé, rouge, liquoreux, effervescent), les conséquences sur les caractéristiques sensorielles et analytiques des vins seront très variables.

Ajuster les modalités de récolte

En complément de la décision d'une date de vendange, les modalités de récolte des raisins présentent aussi un impact potentiellement très significatif sur les caractéristiques des vins. En effet, entre la récolte manuelle ou mécanique des grappes, la réception des raisins et le début du traitement de la vendange avant fermentation, il se déroule une période pendant laquelle, selon la température de la vendange et les traitements qui lui sont appliqués, différents phénomènes chimiques et biochimiques vont se produire. Ceux-ci peuvent avoir des répercussions sur l'extraction, non sélective, des composés de la baie, particulièrement les composés de la pellicule, ainsi que sur l'enclenchement de phénomènes d'oxydation chimique ou enzymatique dans les jus de raisins, avec brunissement, et sur le développement éventuel de microorganismes fermentaires. Ces phénomènes seront d'autant plus marqués que la température des raisins est élevée.

Pour la récolte des raisins destinés notamment à l'élaboration de vins blancs et rosés, des températures basses (inférieures à 20°C) sont préconisées, ainsi qu'un transport au chai dans les meilleurs délais. Cela permet de préserver la qualité des raisins et le caractère aromatique des vins. C'est pourquoi, avec l'avènement des machines à vendanger, il est fréquent que les récoltes se déroulent tôt le matin pour bénéficier de températures fraîches, voire la nuit (fig. I-8-2). Certaines caves coopératives des régions méridionales

imposent même à leurs adhérents une heure limite dans la matinée pour les apports de vendanges. Cependant, avec l'accroissement du réchauffement climatique, même cette pratique peut rencontrer certains jours des limites, notamment au mois d'août ou début septembre. En effet, la température de l'air et des raisins peut ne pas descendre la nuit en dessous de 25°C. Les vinificateurs sont alors obligés de refroidir la vendange dès la réception au chai, avec l'accroissement de la consommation énergétique que cela entraîne.

Le refroidissement de la vendange est possible par l'incorporation de neige carbonique ou de sticks de glace carbonique (carboglace), voire l'utilisation de tunnels pour l'application d'azote ou de CO₂ liquide. Il faut environ 1 à 1,2kg de neige carbonique pour abaisser de 1°C la température de 100kg de vendanges. Ce refroidissement permet aussi de limiter l'extraction de composés de la baie, avant le début des opérations préfermentaires, ce qui peut être opportun pour des vendanges à maturité avancée. Ces procédés permettent en outre de limiter des phénomènes non souhaités d'oxydation enzymatique de composés de la baie (arômes, composés phénoliques), avec des conséquences sur la composante qualitative des vins. De manière complémentaire, il sera important d'éviter la trituration des raisins avant réception en cave, c'est-à-dire lors de la récolte et de l'acheminement des raisins, puis à la réception en cave, afin de limiter l'extraction non sélective des composants du raisin.

Les risques de développement de microorganismes non souhaités sur la vendange seront aussi minorés par le refroidissement et en évitant sa trituration. En complément, les pratiques dites de bioprotection, qui consistent à incorporer directement sur la vendange des levures non-*Saccharomyces* appartenant aux espèces *Torulasporea delbrueckii* ou *Metschnikowia pulcherrima*, permettront de restreindre le développement de levures oxydatives ou de bactéries non souhaitées. Pour une vendange à maturité avancée, la dose d'emploi devrait se rapprocher de 10-20 g/hL, et non 5-10 g/hL comme considéré habituellement (Windholtz et al., 2021).



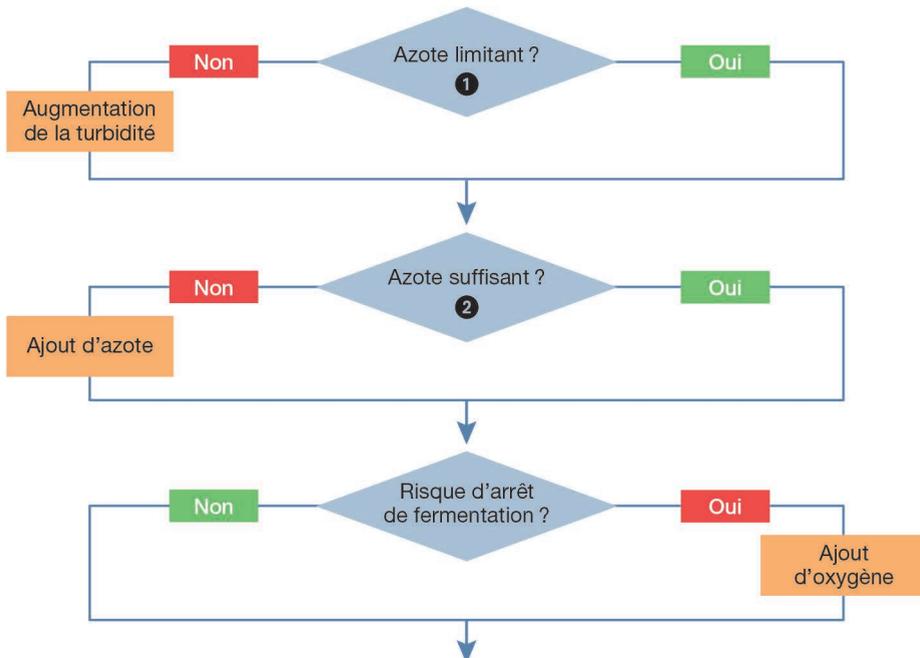
Figure I-8-2. Vendange à la machine, au lever du jour, dans la région de Limoux (Aude).
© Alain Samson, INRAE.

Optimiser la vinification

Le contrôle des fermentations alcoolique et malolactique est essentiel et, si de nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années, l'évolution de la composition de la matière première, plus particulièrement l'augmentation de la teneur en sucres et la diminution de l'acidité, constitue un nouveau défi.

Sécuriser les fermentations

Pour sécuriser l'achèvement des fermentations, la gestion de la nutrition des levures est un point clé. Les principaux nutriments, en premier lieu l'azote assimilable, l'oxygène et les composés lipidiques (présents dans les particules solides), sont identifiés depuis longtemps, mais des travaux récents (Casalta *et al.*, 2021) démontrent qu'une gestion optimale, permettant de limiter les risques d'arrêt de fermentation, nécessite de prendre en compte les interactions entre ces facteurs et, donc, de raisonner leur gestion de façon globale. L'approche proposée est schématisée sur le logigramme de la figure I-8-3. Elle repose sur plusieurs questionnements : quelle est nature du nutriment limitant, en particulier dans le cas des vinifications en blanc et rosé ? quelle est la quantité d'azote assimilable dans le moût et y a-t-il un intérêt, voire une nécessité, à en rajouter ?



- 1 L'azote est le nutriment limitant pour les levures. La totalité de l'azote assimilable est consommé (jusqu'à environ 400 mg/l).
- 2 L'azote assimilable est en quantité suffisante pour assurer une bonne vitesse de fermentation (en pratique environ 150 mg/l).

Figure I-8-3. Logigramme de la gestion nutritionnelle de la fermentation.
© Jean-Marie Sablayrolles, INRAE.

quels sont les risques d'un arrêt de fermentation, avec une présence de sucres résiduels, étant donné qu'ils sont beaucoup plus importants lorsque la teneur en sucres du moût est élevée ? En fonction de la situation, l'intervention recommandée, qui vise à optimiser l'état physiologique des levures en fin de fermentation, est donc différente.

Cette stratégie permet de répondre à la grande majorité des situations à risques. Elle n'est cependant pas exhaustive et d'autres solutions sont possibles. On peut par exemple apporter des nutriments complexes tels que des levures inactivées, soit pendant la phase de réhydratation, soit en cours de fermentation, ce qui peut permettre de combiner l'effet bénéfique des nutriments azotés et lipidiques. On peut aussi augmenter le taux d'ensemencement en levain jusqu'à 20 g/hL, ce qui est aussi un moyen de favoriser la survie finale des levures. Enfin, d'autres mécanismes peuvent intervenir, tels que les limitations en d'autres nutriments (sels minéraux, vitamines, etc.) ou la présence d'inhibiteurs (comme les pesticides), mais ils sont plus difficiles à mettre en évidence et semblent relativement marginaux.

La gestion de la température est de mieux en mieux assurée, mais un point de vigilance demeure vis-à-vis des températures excessivement élevées, au-delà de 32-35 °C dans le cas des vinifications en rouge, ou, au contraire, trop basses, en deçà de 10-12 °C lors de l'élaboration de certains vins blancs. Par ailleurs, il convient de noter que les préconisations actuelles concernent quasi exclusivement les levures *Saccharomyces cerevisiae* et doivent donc être complétées pour l'utilisation de non-*Saccharomyces*.

À plus long terme, la prise en compte simultanée de l'ensemble des paramètres (gestion de la cuverie, frigos et aspects qualitatifs) pourra être favorisée par des approches prédictives basées sur la modélisation, comme proposé par Mouret *et al.* (2019).

Limiter la teneur en éthanol

La limitation des teneurs en alcool dans les vins constitue un objectif majeur dans le contexte du changement climatique. Les pratiques œnologiques peuvent y contribuer, en complément de l'évolution de l'encépagement et des approches viticoles.

D'un point de vue microbiologique, il s'agit de rechercher des levures effectuant la fermentation alcoolique, avec un rendement plus faible en éthanol et sans augmentation de la production de composés néfastes au niveau sensoriel. La biodiversité naturelle chez *S. cerevisiae*, l'espèce qui est largement la plus utilisée, est limitée et ne permet pas des différences supérieures à 0,5 % vol. Plusieurs études ont permis de construire des souches, non OGM (organismes génétiquement modifiés), dans lesquelles une partie du flux métabolique est déviée vers la surproduction de composés tels que le CO₂ et le glycérol. Certaines d'entre elles permettent d'atteindre une baisse de la production d'éthanol de 1 à 1,5 % vol., tout en conservant de bonnes propriétés œnologiques. Une autre piste consiste à utiliser des souches non-*Saccharomyces*, et ainsi avoir accès à une plus grande diversité. De nombreux travaux sont actuellement menés sur le sujet, avec des perspectives de diminution plus importantes du titre alcoométrique (TAV % vol.) (Ivit *et al.*, 2020). Cependant, l'utilisation de telles levures se heurte, pour l'instant, à des difficultés de mise en œuvre qui sont d'autant plus importantes que ces souches doivent généralement être utilisées en cocultures ou en cultures séquentielles avec des souches de *S. cerevisiae*. En effet, des problèmes de compatibilité entre souches peuvent survenir en lien avec la compétition pour les nutriments ou la synthèse de composés toxiques pour les fermentations.

Des méthodes physicochimiques sont aussi utilisables, soit pour réduire la teneur en sucres dans les moûts, soit pour extraire une partie de l'éthanol dans les vins. L'abaissement de la teneur en sucres des moûts est principalement basé sur des techniques d'ultra- et de nanofiltration. L'extraction d'éthanol peut être effectuée avec différentes méthodes basées majoritairement sur des techniques membranaires : osmose inverse et contacteurs à membranes (fig. I-8-4). Pour des opérations de désalcoolisation plus poussées, pouvant conduire à des vins sans alcool (< 0,5%), l'évaporation sous vide est généralement préférée (notamment grâce à la technologie des *spinning cone columns* ou colonnes à cônes rotatifs²⁸). Ces techniques sont d'ores et déjà utilisées en cave, d'autant plus que la législation sur les vins autorise une correction jusqu'à 20% du TAV total. Elles présentent cependant des coûts non négligeables et, bien que leur objectif soit d'améliorer la qualité organoleptique des vins, leur dimension « technologique » est parfois considérée comme un inconvénient par certains vinificateurs et consommateurs. Par ailleurs, ces techniques membranaires peuvent parfois appauvrir l'arôme des vins ; des travaux sont actuellement conduits pour améliorer ces procédés.

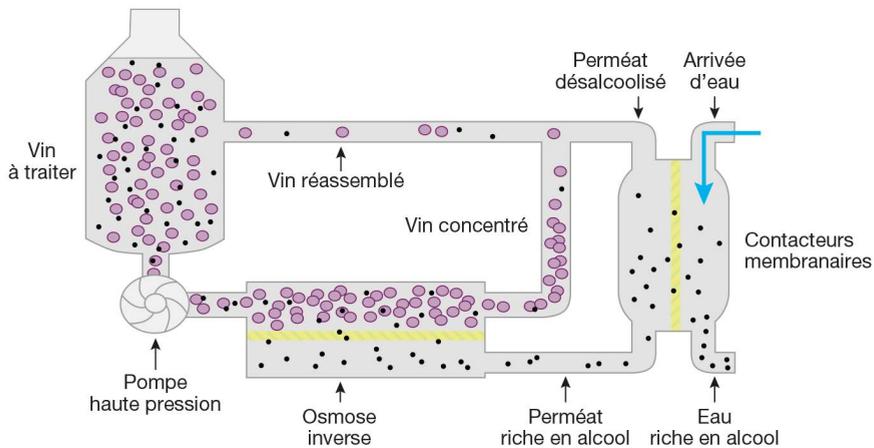


Figure I-8-4. Schéma de la technique de désalcoolisation partielle des vins par un couplage de l'osmose inverse et de contacteurs membranaires. D'après Gemstab.

Gérer l'acidité

La baisse de l'acidité des moûts est un sujet de préoccupation important dans de nombreuses régions. La pratique habituelle pour la maîtriser demeure l'ajout d'acide tartrique, lactique ou malique. Cette pratique est facile à mettre en œuvre et peu coûteuse. Par contre, son efficacité est mal maîtrisée, en particulier à cause des phénomènes de précipitation. Le procédé électromembranaire d'électrodialyse et les résines échangeuses d'ions sont autorisés pour diminuer la valeur de pH jusqu'à 0,3 unité. Ces techniques, qui sont utilisées sur vin, donc postfermentaires, sont plus précises et n'utilisent aucun inérant. Elles peuvent toutefois être limitantes en termes de coût et de disponibilité de la technologie. De plus, elles ne sont pas autorisées actuellement en France dans le cahier des charges de l'agriculture biologique.

28. Technique conçue en deux étapes pour extraire sous vide et récupérer les composés volatils du vin, avant de les réincorporer, après désalcoolisation du vin.

Une perspective, d'ordre microbiologique, est l'utilisation de levures acidifiantes. Certaines *S. cerevisiae* possèdent cette caractéristique de moduler la synthèse ou dégradation d'acide malique. Ainsi, une étude récente a permis de sélectionner des souches de *S. cerevisiae* pouvant produire jusqu'à 3 g/L d'acide malique (Vion *et al.*, 2023). Certaines levures non-*Saccharomyces*, en particulier celles du genre *Lachancea*, augmentent la teneur en acide lactique, alors que d'autres (*Starmerella bacillaris* et *Candida stellata*) peuvent également provoquer une acidification importante grâce à la production d'acide pyruvique ou succinique (Vicente *et al.*, 2022). Malgré tout, comme dans le cas de la baisse du rendement en éthanol, des études complémentaires sont nécessaires avant d'envisager une large dissémination de ces approches microbiologiques dans la pratique œnologique, afin notamment de bien évaluer l'impact sensoriel sur les vins concernés.

Adapter l'extraction des polyphénols des raisins

L'évolution de la matière première, liée au changement climatique, concerne un grand nombre de composés, en particulier les polyphénols, qui jouent un rôle clé notamment lors de la vinification en rouge. Cela doit se traduire par une attention particulière portée aux étapes d'extraction/macération et, dans certains cas, par une évolution dans la mise en œuvre des technologies à la disposition du vinificateur.

Lors des vinifications en méthode traditionnelle, une solution est d'adapter les méthodes de macération (pigeage, remontage...), ainsi que leur durée, fréquence et positionnement, avec la possibilité de macérations pré- ou postfermentaires. Il est aussi possible d'influer sur la température de macération et sur la souche de levure employée. L'effet de ces différents paramètres et l'impact sur la typologie des vins sont relativement bien décrits dans la littérature, mais la présence de plus en plus fréquente de matières premières « atypiques » nécessite un travail d'adaptation.

Les technologies préfermentaires telles que la thermovinification ou la *flash détente* constituent une alternative au procédé de macération. L'utilisation d'enzymes ou l'ajout d'intrants tels que les tannins œnologiques ou les copeaux de bois influent sur la quantité et les caractéristiques des vins et leurs propriétés sensorielles. Ces techniques viennent compléter les approches traditionnelles de la vinification pour adapter le processus de macération en fonction de la matière première et du type de vin recherché.

Protéger la qualité aromatique

Dans un contexte de maturation des raisins en conditions thermiques élevées, la composition de la baie sera modifiée, ce qui amènera notamment une moindre accumulation de potentiel aromatique associé à la perception dans les vins de notes florales ou de fruits mûrs, exprimant des dimensions de fraîcheur. De plus, les tonalités de fruits surmûris et de fruits cuits seront fréquemment exacerbées dans les vins. Aussi, une priorité sera d'adopter des modalités de la fermentation incluant l'emploi de microorganismes (levures, bactéries) aptes à mieux révéler le potentiel aromatique du raisin et à renforcer la composante de fraîcheur. En effet, le potentiel aromatique de la plupart des cépages est révélé au cours du processus fermentaire et ce choix des souches ou des espèces de levures sera particulièrement important en vinification en blanc ou rosé. En outre, il conviendra de veiller à la réalisation des fermentations à des températures contrôlées (18-23°C) garantissant un bon déroulement des fermentations et une moindre volatilisation ou dégradation de la composante aromatique.

Par ailleurs, la maturation de raisins blancs en conditions caniculaires conduit généralement à des teneurs plus élevées en acides-phénols et leurs esters. Après décarboxylation enzymatique de ces composés par la levure *S. cerevisiae* au cours de la fermentation alcoolique, une augmentation des teneurs en vinyl-phénols dans les vins est observée, conduisant à alourdir la tonalité aromatique de ces derniers. L'emploi, pour la fermentation des moûts blancs et rosés, de levures *S. cerevisiae* à faible activité hydroxycinnamate décarboxylase permettra de diminuer les teneurs de ces composés dans les vins.

L'accroissement du pH des vins a aussi un impact sur leur conservation. En effet, une élévation du pH moyen des vins de 3,4 à 3,8 peut paraître peu élevée, mais elle rend le milieu plus favorable au développement de flores levuriennes et bactériennes dites de contamination. C'est le cas par exemple des *Brettanomyces* sp. qui sont responsables d'odeurs animales (cheval, écurie, cuir), mais aussi des *Lactobacillus* responsables du goût de souris (cacahuètes, peau de saucisson). L'augmentation de l'acidité volatile (acide acétique) est souvent concomitante à ces déviations aromatiques. La fréquence accrue de ces cas de contamination n'est pas due qu'à une hygiène de cave défectueuse, car il est indéniable que des progrès notables ont été enregistrés dans ce domaine ces dernières années. Il se trouve que les sulfites sont un moyen efficace pour limiter le développement de ces flores de contamination. Or, la progression de vins dits « sans sulfite » ou la diminution des doses de sulfites, pour des raisons hygiéniques, ne facilitent pas la tâche du vinificateur. C'est d'autant plus le cas que l'accroissement du pH des vins déplace l'équilibre de la forme « libre » des sulfites, ce qui conduit à une moindre proportion de la forme dite de SO₂ moléculaire, efficace contre les microorganismes, ainsi qu'à un accroissement de la forme « combinée », qui l'est nettement moins. Ainsi, la tendance sociétale qui va vers une diminution des sulfites et l'augmentation du pH des vins, en lien avec le changement climatique, rend la pratique du sulfitage moins efficace.

Ajuster les modalités d'élevage et les conditions de mise en bouteille des vins

Les vins blancs, rouges ou rosés issus de raisins récoltés en maturité avancée ou surmûris possédant des acidités faibles présentent, de fait, plus de risques d'évolutions organoleptiques non souhaitées au cours de l'élevage et du vieillissement. Bien sûr, l'acidité joue un rôle essentiel dans l'équilibre gustatif des vins. Cependant, le niveau d'acidité du vin va aussi influencer les phénomènes microbiologiques et chimiques qui s'y déroulent.

Dans des vins à faible acidité — valeur de pH plus élevée —, les phénomènes d'évolution chimique sont d'autant plus accentués que ces vins présentent une tendance oxydative. Celle-ci est associée à une teinte jaune plus soutenue, à une disposition au brunissement pour les vins blancs et rosés. L'évolution est aussi concomitante d'une perte de fraîcheur aromatique. Elle peut conduire à un vieillissement oxydatif prématuré ou *premoxy* (cf. chapitre I-4). Dans un tel contexte, l'étape de l'élevage, à la fois pour les vins blancs secs, rouges et rosés, doit être adaptée dans sa durée et dans ses modalités, en fonction des typologies de vins.

Il est pertinent d'adapter le niveau d'oxygénation des vins rouges, en ajustant la proportion de barriques neuves (les barriques neuves étant plus perméables à l'oxygène) et en réalisant un inertage par l'emploi de gaz inertes (azote, gaz carbonique, souvent en mélange), qui limitent le contact du vin avec l'oxygène de l'air au cours des étapes de soutirage, puis de stabilisation et de filtration avant la mise en bouteille. *A fortiori*, ces précautions sont essentielles dans un contexte de vins élevés en absence ou avec de faibles doses de sulfites. Pour les vins blancs secs ou rosés, la pratique de l'élevage sur lies totales avec remise en suspension des lies ou « bâtonnage » contribue à renforcer les propriétés antioxydantes de ces vins. Des points de vigilance concernent la durée d'élevage, ainsi que l'inertage lors du soutirage avant stabilisation et filtration, comme évoqué pour les vins rouges.

En outre, après la mise en bouteilles, la préservation de la composante de fraîcheur ou inversement l'apparition de caractéristiques sensorielles propres au vieillissement oxydatif sont très dépendantes du choix de l'obturateur et de sa perméabilité à l'oxygène (fig. I-8-5). Des travaux de recherche ont démontré les liens entre la perméabilité de l'obturateur et la diminution des teneurs en dioxyde de soufre libre, ainsi que la chute de composants aromatiques de la composante fraîche et fruitée. De plus, des obturateurs plus perméables contribuent à l'accroissement de la teneur en composés d'arôme marqueurs de l'évolution oxydative des vins (Vidal et Moutounet, 2007 ; Pons *et al.*, 2019a et b).

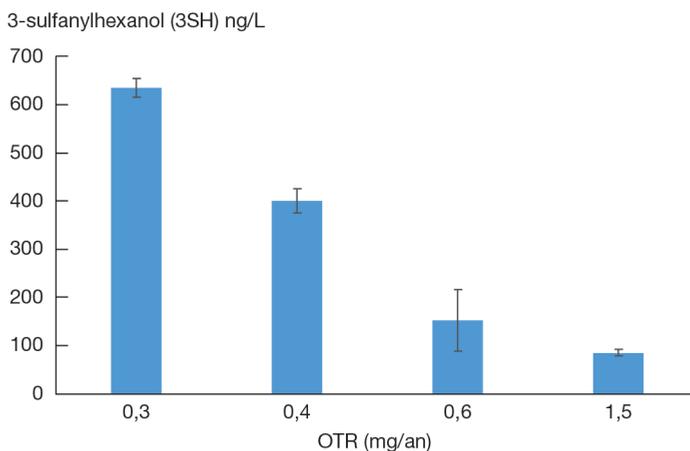


Figure I-8-5. Concentrations d'un marqueur de la composante aromatique fruitée des vins de Sauvignon blanc (3SH ou 3-sulfanylhexanol, composé avec notes aromatiques de pamplemousse), après 10 ans de vieillissement en bouteilles, en fonction de la perméabilité à l'oxygène de l'obturateur (OTR ou taux de transfert d'oxygène, en mg/an). D'après Pons *et al.*, 2019.

Conclusion

De nombreuses stratégies peuvent être utilisées pour adapter la vinification aux conséquences du changement climatique sur la composition des raisins. Certaines d'entre elles sont déjà opérationnelles, tandis que d'autres sont encore à l'étude, avec une évolution vers une « œnologie de précision » visant à s'adapter à chaque situation.

Plus globalement, l'objectif n'est pas seulement de corriger les défauts, tels que des concentrations élevées d'éthanol ou une faible acidité, mais d'améliorer la connaissance des composés marqueurs de la qualité des raisins, de mieux appréhender leur évolution durant la vinification et, en faisant appel à l'exploitation de bases de données, de mettre en place le plus en amont possible des stratégies optimales intégrant à la fois des approches viticoles et œnologiques. La demande sociétale qui va vers une alimentation avec moins d'intrants ne doit pas rejeter pour autant l'utilisation de technologies physiques au cours des itinéraires de transformation des raisins en vin, au risque de voir une évolution organoleptique défavorable des vins.

LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE COMME LEVIER D'ADAPTATION

Benjamin Bois, Hervé Quénot et Etienne Neethling

Introduction

Le territoire est un concept géographique que nous déclinerons, dans le présent chapitre, au cas plus spécifique du territoire viticole, avec la définition proposée dans le cadre d'un séminaire organisé par l'équipe du projet Laccave en septembre 2021, consacré aux conséquences et à l'adaptation au changement climatique à l'échelle des territoires : « Zone contiguë de décisions et d'actions collectives sur laquelle se construisent des processus d'adaptation au changement climatique. »

La notion de territoire viticole proposée ici est dynamique : son périmètre spatial s'étend, se contracte, se morcèle ou s'agglomère dans le temps, et les actions collectives qui y sont menées évoluent selon le contexte environnemental et socio-économique. Toutefois, l'espace géographique du territoire présente un ensemble de caractéristiques physiques (au sens « géographie physique » du terme) relativement stables dans le temps ou offrant une grande inertie temporelle : il s'agit du relief, de l'occupation du sol, de la nature du sol et du sous-sol et, dans une certaine mesure, du climat. Le climat correspond à la succession des conditions météorologiques à long terme, c'est-à-dire l'état moyen de l'atmosphère sur cette période (définition de l'Organisation météorologique mondiale). Évidemment, il évolue, notamment en raison du changement climatique contemporain, mais ses grandes caractéristiques (saisonnalité, variabilité spatiale) sont maintenues sur plusieurs années, voire décennies, parce que façonnées en grande partie par la position géographique et le relief du territoire.

Étudier l'évolution temporelle et spatiale du climat à l'échelle d'un territoire viticole dans le contexte du changement climatique nécessite une approche multiscale (de l'échelle globale à l'échelle locale). Cela est d'autant plus important que ce sont souvent les caractéristiques climatiques locales (fortement dépendantes des caractéristiques physiques du territoire) qui vont définir les spécificités d'un vignoble et du vin produit (Quénot *et al.*, 2017 ; Neethling *et al.*, 2019). L'influence des caractéristiques physiques du milieu sur le climat va fortement varier suivant l'échelle d'analyse et des objectifs souhaités. Une étude climatique visant à différencier des régions viticoles (Champeau *et al.*, 1996 ; Tonietto et Carbonneau, 2004) ne prendra pas en compte des paramètres tels que la nature et le type de sol, alors qu'une analyse climatique à une échelle plus fine de type « étude de terroir viticole » nécessitera d'intégrer l'impact de ces éléments (Neethling *et al.*, 2019).

Prenons, à titre d'exemple, un espace viticole d'environ 12000ha : l'aire d'appellation de Saint-Émilion et des appellations des communes voisines, dites « satellites », en Gironde viticole. On y trouve des sols aux caractéristiques très variées, basiques à acides, sableux à argileux, très ou non pierreux (Van Leeuwen, 1991). L'amplitude moyenne annuelle des maxima (0,8°C) et des minima (2,5°C), calculée sur une période de huit années, y est relativement large. On y observe des écarts spatiaux, pour un même cépage (le Merlot), de 9 jours en moyenne pour la date de mi-floraison et de 13 jours pour la date de mi-véraison (de Rességuier *et al.*, 2020). Le relief, bien que peu accidenté sur ce territoire, peut entraîner des écarts de rayonnement potentiel incident sensibles (jusqu'à 23% d'écart en moyenne quotidienne sur la période de maturation du raisin ; Bois *et al.*, 2008a). Les conséquences du changement climatique vont donc différer selon les secteurs de cet espace viticole. La demande évaporative, largement gouvernée dans cette région par le rayonnement solaire (Bois *et al.*, 2008b), n'aura probablement pas les mêmes impacts sur l'état hydrique de la vigne selon la nature du sol (réserve utile, capacité d'enracinement, contribution du matériau parental à l'alimentation hydrique de la vigne). On peut supposer que les secteurs les plus exposés au rayonnement et dont la réserve utile est limitée (par ex. les rendosols calcaires de haut de versant ; Van Leeuwen, 1991) souffriront davantage de l'élévation de la température dans les prochaines décennies que les sols alluviaux profonds de la plaine de la Dordogne. À l'évidence, cette diversité des conséquences du changement climatique devrait nécessiter le déploiement de stratégies d'adaptation *ad hoc*.

Le présent chapitre questionne cette variabilité spatiale de l'environnement physique du territoire viticole, et revient sur les méthodes permettant de la documenter au niveau du climat et de l'intégrer dans la prise en compte de l'adaptation au changement climatique. Après avoir présenté la démarche scientifique suivie et les outils permettant d'analyser la variabilité climatique d'un territoire viticole, plusieurs questions seront abordées : comment construire des projections du climat futur à l'échelle d'un territoire ? Comment évaluer les conséquences attendues de ces projections pour la production de vin ? Comment ces projections du climat futur pourront-elles servir à définir des stratégies d'adaptation ?

Évaluer la variabilité climatique d'un territoire dans le contexte du changement climatique

L'avènement de la géomatique, l'accroissement exponentiel des capacités de stockage de données numériques et la standardisation des méthodes d'échange de ces données ont permis la mise à disposition d'une très large quantité d'informations géographiques permettant de décrire le milieu physique des territoires viticoles.

La résolution spatiale et la vitesse de cartographie du milieu physique bénéficient de connaissances généralisées plus fines du relief (modèles numériques de terrain, MNT, et d'élévation, MNE) à l'échelle planétaire, grâce à des missions spatiales telles que SRTM (Shuttle Radar Topography Mission ; Van Zyl, 2001), mais également, comme en France à partir de 2021, grâce à la mise à disposition généralisée en *open access* de données topographiques à haute résolution par l'IGN. Aussi, selon le niveau d'échelle considéré, il est possible de produire rapidement une qualification des caractéristiques topographiques d'un territoire viticole (Vincent *et al.*, 2014).

La télédétection et la métrologie *in situ*, ainsi que l'automatisation et la miniaturisation des dispositifs de mesure et de stockage des données climatiques depuis la fin du xx^e siècle ont conduit à l'élaboration de méthodologies pour l'analyse spatiale du sol et du climat, ainsi qu'à leurs mises en œuvre pour cartographier le milieu physique des terroirs viticoles à différents niveaux d'échelles. Ainsi, une littérature scientifique conséquente sur le sujet a été produite durant les deux dernières décennies (voir par ex., Quénol, 2014).

L'Organisation internationale de la vigne et du vin propose une résolution présentant un cadre méthodologique pour la mise en œuvre de zonages au niveau du sol et du climat (Lignes directrices OIV des méthodologies du zonage vitivinicole au niveau du sol et au niveau du climat, 2012), dont une version mise à jour proposée par Van Leeuwen et Bois (2018).

Le zonage est une étape aval de la cartographie, simplifiant l'espace selon des critères pertinents en classes opérationnelles pour le diagnostic, la prise de décision ou la mise en œuvre d'actions sur le territoire. S'agissant du zonage climatique en milieu viticole, on pourra scinder par exemple l'espace en zones de niveau de précocité potentielle homologue, selon que l'on se situe dans une zone où la chaleur nécessaire à la maturation du raisin s'y accumule dans un délai plus ou moins court (Bois *et al.*, 2018; Gavrilesco *et al.*, 2018). En amont du zonage, il aura fallu définir un ou plusieurs objectifs de cette démarche (zonage de précocité potentielle, des risques liés au climat, fussent-ils phytosanitaires, liés au gel ou à l'échaudage du raisin...) et choisir la précision spatiale (échelle) visée. Selon les objectifs fixés, les variables d'intérêt et la méthode d'échantillonnage spatial pourront différer. Dresser une carte des secteurs exposés à la grêle peut s'appuyer sur des données issues de l'analyse de radar pluviométrique (Fluck *et al.*, 2021), alors que la cartographie de la température de l'air privilégiera la mesure locale par des thermomètres (ou équivalents) sous abri, couplée à des informations décrivant le relief (voir par ex. Bois *et al.*, 2018; de Rességuier *et al.*, 2020).

Une fois les objectifs et la précision cible fixés, il est possible d'engager un processus de cartographie et de zonage climatique qui peut être segmenté en cinq étapes (fig. I-9-1).

En premier lieu (étape 1, fig. I-9-1), il convient de collecter des éléments contextuels à échelle plus petite que celle ciblée pour la réalisation du zonage. Pour la cartographie du sol et/ou du sous-sol, on s'intéressera aux contextes géomorphologique et géologique. Pour le climat, on considèrera les types de climats de la zone d'étude, en s'appuyant par exemple sur les classes de Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007) ou sur des classifications plus fines au niveau national (pour la France, on peut citer Joly *et al.*, 2010). Cette contextualisation vise à appréhender la nature du milieu physique, identifier les paramètres géographiques auxquels on devra porter une plus grande attention, et estimer la variabilité attendue de la ou des variable(s) climatique(s) étudiée(s), afin de choisir une méthodologie de cartographie adaptée et de potentiellement ajuster l'échelle visée en fonction des délais et moyens humains, techniques et financiers pour mener le zonage.

La deuxième étape consiste à caractériser la variabilité et la structuration spatiale du sol ou des variables climatiques étudiées. L'analyse en premier lieu de covariables (dites « ancillaires »), telles qu'un modèle numérique de terrain et ses dérivés décrivant le relief (pente, orientation, etc.), des données d'occupation du sol (masses d'eau, végétation, zones urbaines, etc.), des cartes de sol déjà disponibles ou encore des données issues de la télédétection (température de surface, indices de végétation, couleur et texture du sol...),

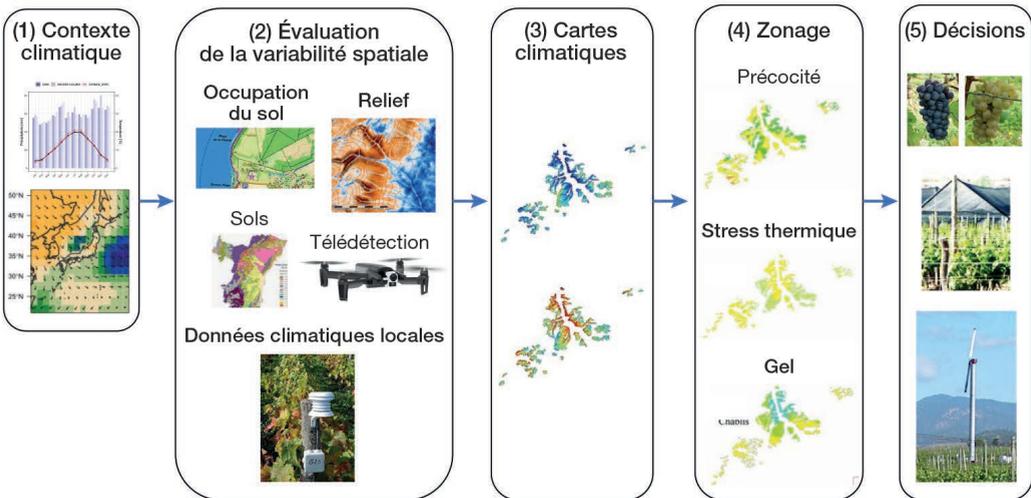


Figure I-9-1. Schéma décrivant la pratique du zonage climatique en milieu viticole.

On décrit d'abord (1) le contexte climatique (régimes de circulation, centre d'action...) permettant d'identifier, selon l'échelle spatiale retenue, les éléments géographiques (latitude, masses océaniques et continentales, relief, occupation du sol...) qui vont affecter la distribution spatiale des éléments à cartographier. La variabilité spatiale de la (des) variable(s) climatique(s) étudiée(s) est ensuite (2) évaluée au moyen de mesures (télédétection, mesures climatiques par des capteurs ou stations) et/ou inférée en l'absence de mesure par des covariables (sols, topographie...). Puis, on spatialise (3) la (les) variable(s) climatique(s) (interpolation spatiale, télédétection). Les variable(s) climatique(s) peuvent alimenter des modèles bioclimatiques (en amont ou en aval de l'étape de spatialisation) pour évaluer les impacts de la (des) variable(s) climatique(s) étudiée(s) en viticulture. Enfin, on identifie des zones pour lesquelles on attend des conséquences similaires du climat pour la viticulture (zonage, étape [4]), permettant des prises de décision opérationnelles (5).

peut s'avérer très utile (Dobesch *et al.*, 2007 ; Li et Heap, 2014). Ces données permettront de construire un échantillonnage pertinent, à la fois au niveau du positionnement des points d'échantillonnage (capteurs ou stations climatiques) dans l'espace et de la densité du maillage (Hengl, 2006).

En climatologie, l'échantillonnage par des stations (ou capteurs) climatiques nécessitera un certain temps de collecte des données. La durée minimale ou optimale de cette période de mesure des variables climatiques est un sujet qui n'a pas fait, à notre connaissance, l'objet d'étude *ad hoc* permettant de proposer des règles de décision en fonction du milieu et des variables étudiées et des objectifs souhaités. Empiriquement, on estime en étudiant les résultats de travaux²⁹ s'intéressant à la cartographie de la température en milieu naturel viticole que l'échantillonnage sur trois à six ans suffira à identifier les secteurs gélifs ou potentiellement précoces, eu égard à la phénologie de la vigne ou la maturation du raisin. En effet, les travaux menés à mésoéchelle (Bois *et al.*, 2018 ; Gavrilesco *et al.*, 2018) comme à l'échelle locale (de Rességuier *et al.*, 2020 ; Le Roux *et al.*, 2017 ; Quénot, 2014) ont montré une grande récurrence de la structuration

29. Selon les résultats du projet Life-Adviclim (Observation à haute résolution des scénarios d'adaptation et d'atténuation pour la viticulture, <https://www.adviclim.eu/fr>), les données de température acquises sur les différents sites pilotes ont montré une structure spatiale similaire durant chaque saison végétative.

spatiale des températures d'une année sur l'autre, du fait du rôle clé de la topographie (en particulier du relief) sur cette dernière. S'agissant des précipitations, la durée requise est probablement bien plus longue (plusieurs décennies), notamment à l'échelle locale, où la structuration spatiale des champs de pluie n'est pas récurrente, notamment d'une année sur l'autre (Bois *et al.*, 2020).

La troisième étape vise à produire des cartes présentant une information continue dans l'espace. Cette spatialisation est réalisée typiquement par un processus d'interpolation spatiale : il s'agit d'une démarche consistant à estimer dans l'espace une donnée, ici climatique, en des lieux où elle n'a pas été mesurée. Cette estimation peut intégrer des covariables environnementales (relief, occupation du sol...), qui améliorent souvent la qualité de l'interpolation (Li et Heap, 2014). Mais l'interpolation spatiale n'est pas nécessaire lorsque la cartographie s'appuie sur la télédétection, par exemple pour cartographier les précipitations (radar pluviométrique) ou le rayonnement global (Bois *et al.*, 2008a; Pauthier *et al.*, 2016). L'utilisation de modèles climatiques régionaux, également, produit directement des données climatiques spatialisées. On pourra citer par exemple l'utilisation du modèle WRF (*Weather Research et Forecasting*) employé en Nouvelle-Zélande afin de produire des champs de température utilisés pour évaluer la précocité potentielle de la vigne ou le risque de gel printanier (Sturman *et al.*, 2017).

Ces modèles numériques de climat sont souvent recalibrés ou débiaisés à l'aide de mesures climatiques par un nombre limité de stations météorologiques; ils fournissent des données climatiques spatialisées plus proches des valeurs mesurées. C'est le cas par exemple des données Safran, combinant différentes sources dont des réanalyses de simulations climatiques numériques (Vidal *et al.*, 2010).

La quatrième étape consiste à produire des cartographies d'indicateurs pertinents pour la viticulture.

En agroclimatologie, de nombreux indices ont été proposés, décrivant la précocité potentielle (fondés souvent sur le cumul de degrés jours) comme l'indice de Winkler, les ressources en eau disponibles en intégrant la seule composante climatique comme l'indice de sécheresse, ou encore des indices relatifs aux aléas climatiques comme les risques de gelées de printemps, d'hiver ou les échaudages (voir par ex. les indicateurs proposés dans les lignes directrices OIV des méthodologies du zonage vitivinicole au niveau du sol et au niveau du climat [2012] ou encore ceux proposés par Bois *et al.*, 2014). Outre des indicateurs climatiques, des dates de stades phénologiques clés (débourrement, floraison...) ou de « maturité » théorique du raisin sont prévisibles, avec une précision de l'ordre de quelques jours à une quinzaine de jours, à l'aide de modèles de cumul thermique plus ou moins complexes (García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2009; Parker *et al.*, 2020). Les bases de données cartographiques de sol et de climat produites peuvent également alimenter des modèles agronomiques plus complexes tels que des modèles de bilan hydrique (Naulleau *et al.*, 2022a) ou des modèles de plante entière (Brisson *et al.*, 2003).

La cinquième étape, le zonage, consiste à classer l'espace en zones sur lesquelles l'analyse ou la gestion du vignoble sera similaire. Il s'agit par exemple d'identifier trois catégories de précocité potentielle de la vigne en fonction des degrés jours : zones précoces, intermédiaires ou tardives.

Construire les projections du climat futur à l'échelle d'un territoire

L'approche fondée sur l'analyse du climat à l'échelle du territoire par l'intermédiaire de réseaux de mesures *in situ* et d'interpolations spatiales des données avec des outils géostatistiques permet de fournir des cartes climatiques à haute résolution spatiale. Dans le contexte du changement climatique, la principale difficulté est de suivre cette démarche en intégrant les simulations du climat futur à l'échelle d'un territoire. La majeure partie des travaux sur l'adaptabilité climatique de la vigne en fonction des scénarios du changement climatique sont réalisés à partir de données issues de modèles climatiques régionaux (Hannah *et al.*, 2013; Moriondo *et al.*, 2013; Fraga *et al.*, 2014). Or, malgré les énormes progrès réalisés ces dix dernières années pour la résolution spatiale des projections climatiques (désormais de quelques kilomètres carrés), celle-ci n'est toujours pas suffisante pour prendre en compte l'influence de paramètres locaux (comme la topographie et les types de sols), alors que ces paramètres sont déterminants sur les caractéristiques de la vigne et des vins. Afin d'obtenir des projections climatiques à une échelle suffisamment fine, les sorties de modèles d'échelle plus large doivent être soumises à une phase dite de descente d'échelle (*downscaling*), nécessitant l'application de méthodes et d'outils plus ou moins complexes.

La descente d'échelle : du régional au local

Les modèles climatiques globaux (MCG) qui représentent le fonctionnement climatique à l'échelle de la planète ont une résolution de plusieurs dizaines de kilomètres. Ainsi, les processus et phénomènes atmosphériques se produisant à une résolution horizontale de moins de 10 km ne sont pas bien représentés, car ces modèles ne tiennent pas compte des variations à fine échelle des caractéristiques de la surface (telles que la complexité du terrain et l'utilisation des sols) et de la variabilité spatiale du climat qui en résulte. Des méthodes de réduction d'échelle sont donc utilisées pour intégrer les effets de la variabilité complexe de la surface et augmenter ainsi la résolution spatiale des modèles. Deux méthodes de réduction d'échelle (parfois complémentaires) sont utilisées.

La descente d'échelle dynamique

Elle permet de régionaliser les résultats des MCG vers des sous-zones plus petites de la surface de la Terre. Pour ce faire, elle utilise les équations physiques associées aux processus atmosphériques et à leurs interactions avec les caractéristiques de la surface, y compris le terrain et l'utilisation des sols. Les modèles climatiques régionaux sont des modèles climatiques globaux à réduction d'échelle dynamique, qui visent à régionaliser les résultats des modèles globaux, en utilisant une imbrication de grilles de modèles de résolution croissante. La première grille est donc forcée à ses limites par des champs atmosphériques à basse résolution (issus des MCG), tandis que la dernière grille fournit des simulations à la résolution la plus fine. Ces grilles fines représentent la circulation de l'atmosphère à l'échelle régionale. Les projections régionalisées réalisées sur la France sont principalement issues de descente d'échelle dynamique et permettent d'obtenir des données simulées tous les 8 km

(maille Safran; Soubeyroux *et al.*, 2021). Plusieurs études ont utilisé les projections régionalisées du changement climatique avec une résolution accrue pour caractériser la variabilité spatiale du climat d'une région viticole (Sturman *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2012). L'avantage de la réduction d'échelle dynamique est qu'elle est fondée sur la même approche que les MCG en tentant de représenter les processus physiques réels opérant dans l'atmosphère à l'échelle la plus fine possible. L'inconvénient est que cette approche nécessite des ressources informatiques importantes, ce qui rend difficile l'obtention de résultats satisfaisants à une échelle très fine (résolution inférieure à 1 km), en particulier sur de longues périodes (Quénol *et al.*, 2017).

La réduction d'échelle à l'aide de méthodes statistiques

Elle nécessite moins de capacité de calcul, ce qui peut permettre d'atteindre une résolution spatiale plus fine, donc plus en adéquation pour les travaux à l'échelle d'un territoire. La réduction d'échelle statistique implique l'application d'un certain nombre de techniques statistiques pour identifier la relation entre une variable climatique sélectionnée (telle que la température de l'air) et les caractéristiques de la surface (telles que l'altitude, la pente, l'exposition ou la nature de la surface). L'identification de cette relation peut être réalisée à l'aide de plusieurs méthodes statistiques, notamment la régression linéaire multiple ou les réseaux neuronaux. Ces méthodes empiriques s'appuient généralement sur des données climatiques obtenues à partir de réseaux de stations météorologiques. L'un de leurs principaux avantages est qu'elles intègrent l'impact des caractéristiques de territoires spécifiques sur les variations climatiques à fine échelle, mais aussi qu'elles nécessitent beaucoup moins de ressources informatiques. Toutefois, elles présentent l'inconvénient de n'être valables que pour l'ensemble de données à partir duquel elles ont été dérivées.

Intégrer la variabilité spatiale du climat à fine échelle dans les projections régionalisées du climat

Les méthodes statistiques sont donc particulièrement appropriées pour modéliser la variabilité spatiale du climat à l'échelle locale. Combinée aux scénarios climatiques régionaux (issus de la descente d'échelle dynamique), l'analyse de la variabilité spatiale du climat local permet d'affiner la résolution spatiale des modèles et d'obtenir des projections climatiques futures à l'échelle d'un territoire. L'intégration de la variabilité spatiale du climat à échelle fine dans les scénarios du changement climatique nécessite donc la combinaison entre des méthodes de modélisation dynamiques et statistiques, en forçant les sorties régionalisées du changement climatique avec les données spatialisées à échelle fine.

Cette approche d'intégration de la variabilité climatique spatiale à l'échelle locale dans les modèles climatiques régionaux a notamment été suivie dans le cadre du projet européen Life-Adviclim, dont l'un des objectifs a été de réaliser des projections climatiques futures à l'échelle de la parcelle viticole. Cette étude s'est concentrée sur plusieurs vignobles dans différentes régions viticoles européennes (Quénol *et al.*, 2014; de Rességuier *et al.*, 2020). Des réseaux de capteurs disposés selon les caractéristiques locales ont été utilisés pour acquérir des données de température de l'air sur chaque site pilote, dans le but de fournir des cartes journalières (par méthodes d'interpolation géostatistique) de la variabilité spatiale des températures. Ici, la méthode de descente

d'échelle est fondée sur l'identification des régimes météorologiques à l'aide de la classification des types de temps. Les classes de type de temps sont ensuite associées à des modèles spatiaux des températures interpolées quotidiennement. Les sorties régionalisées Euro-Cordex (résolution 12km) ont été forcées par le modèle climatique local (résolution 25 m) pour les périodes 2031-2050 et 2081-2100 selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (fig. I-9-2). La variabilité spatiale du climat au sein des sites pilotes est similaire, voire supérieure, à l'augmentation de la température (sommées de degrés jour) entre la période actuelle et les périodes futures 2050 et 2100 (Quénol et Le Roux, 2021). Les résultats ont montré que la très grande variabilité spatiale du climat due aux effets locaux permet donc d'identifier plus clairement les secteurs du vignoble plus ou moins favorables à une viticulture de qualité dans le contexte du changement climatique (encadré I-9-1). Cependant, la principale faiblesse de l'approche statistique est qu'il s'agit d'un modèle statique indépendant de la physique atmosphérique. Par conséquent, on suppose que les relations statistiques définies à partir du climat actuel resteront inchangées dans les climats futurs.

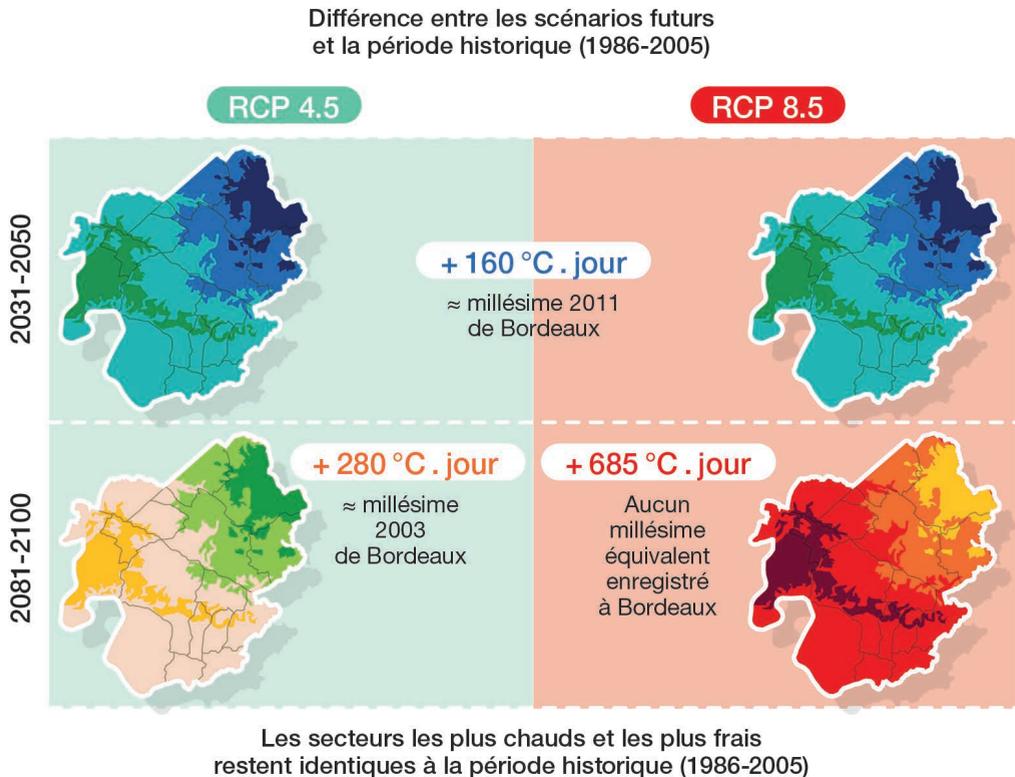


Figure I-9-2. Projections du climat futur (indice de Huglin) à haute résolution spatiale dans les vignobles de Pomerol/Saint-Émilion à horizon 2050 et 2100, selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Source : Petitjean et al., 2020.

À partir de ces scénarios internationaux, des données de température (Euro-Cordex) ont été extraites sur le site d'étude à une résolution de 10 km. Une réduction d'échelle a ensuite été appliquée à l'aide d'un modèle géostatistique afin d'adapter les projections du changement climatique à l'échelle du site pilote.

Encadré I-9-1. L'exemple du vignoble de la région de Saint-Émilion et Pomerol

Le climat joue un rôle important sur le développement de la vigne, la composition du raisin et la typicité des vins. Il varie entre les régions viticoles, mais il présente aussi une variabilité locale qui peut être très importante. L'échelle locale est particulièrement appropriée pour étudier le climat actuel et futur, et analyser son impact sur la viticulture.

Pour étudier ce paramètre dans le cadre du projet Life-Adviclim, 90 capteurs de température ont été installés sur 20 000 ha dans la région de Saint-Émilion, Pomerol et leurs satellites. Les résultats ont montré une grande variabilité climatique sur ce territoire d'environ 284 degrés jour sur l'indice de Huglin (IH), entraînant un écart de maturité de 25 jours. Des cartes de température et de différents stades phénologiques ont été produites à échelle locale. Ces données, couplées avec des cartes pédologiques, sont des outils d'aide à la décision pour orienter la réflexion des viticulteurs, notamment en termes de matériel végétal ou de pratiques viticoles.

Il est intéressant de noter que la variabilité climatique mesurée sur le secteur est aussi importante que l'évolution récente du climat à Bordeaux. Les secteurs les plus frais aujourd'hui ont des IH qui correspondent à ceux des secteurs les plus chauds il y a 30 ans. Qu'en sera-t-il demain ? Des simulations de la température et de la phénologie dans le futur à échelle locale ont été produites. Elles permettent de quantifier les évolutions en fonction de différents scénarios (RCP 4.5 et 8.5) à moyen (2031-2050) et long termes (2081-2100). Même la distribution spatiale et les écarts de température sur ce secteur ne vont pas évoluer, la température va continuer d'augmenter. À moyen terme, quel que soit le scénario, une augmentation de 160 degrés jour de l'IH est attendue, mais à la fin du siècle les évolutions seront très différentes. Pour le scénario RCP 8.5, une augmentation de 680 degrés jours de l'IH est prévue, ce qui nécessitera des adaptations plus fortes.

L'atténuation qui traite des causes du changement climatique a aussi été considérée à l'échelle parcellaire en identifiant les pratiques à faibles émissions de CO₂. Les pratiques les plus émettrices (gestion des maladies, entretien du sol) ont été mises en évidence, tout comme les facteurs d'émission tels que la puissance moteur ou le nombre d'interventions.

Ces résultats recueillis à échelle locale doivent permettre de nourrir les réflexions de la profession viticole et des politiques sur les mesures d'adaptation et d'atténuation à mettre en place face au changement climatique.

Pour plus d'informations : <https://www-ium.univ-brest.fr/wapps/letg/adviclim/BDX/#>.

Évaluer l'impact du changement climatique local en intégrant les pratiques viticoles

Une fois menée cette étape de descente d'échelle des projections climatiques, comment traduire les conséquences de ces dernières pour la viticulture sur un territoire ? La complexité de la tâche dépendra de l'objectif fixé. S'il s'agit d'évaluer des aspects spécifiques de la production vitivinicole, comme les changements attendus relatifs à la date de récolte ou l'évolution de certains paramètres de composition du raisin, des modèles agronomiques seront alimentés à l'aide des données climatiques

projetées à échelle fine. Il s'agira parfois de ne considérer que des modèles assez simples, ne nécessitant qu'un nombre réduit de variables d'entrée, comme des indicateurs de la précocité de la vigne (Le Roux, 2017), ou encore des combinaisons d'indices agroclimatiques tels que la température moyenne en saison de végétation et le nombre de jours avec une température dépassant les 35 °C, causant des dégâts pour la vigne (White et al., 2006).

L'exercice gagne en complexité quand il s'agit de coupler le sol, la plante, le mode de conduite, le relief et le climat, en vue d'étudier avec précision les conséquences du changement climatique sur l'état hydrique de la vigne : voir par exemple les travaux de Hofmann et al. (2022), à l'échelle des territoires viticoles allemands du Rheingau et de Hessische Bergstraße.

Enfin, on peut considérer la diversité pédologique et climatique, mais également la diversité des pratiques viticoles ainsi que les caractéristiques de vins, dans des modèles intégrés ; ces modèles permettent d'évaluer les modifications du rendement, afin d'envisager les stratégies adaptées pour les différents secteurs d'un territoire (Naulleau et al., 2022a).

Vers une redistribution spatiale des espaces viticoles ?

Peut-on prévoir, sur la base de l'analyse spatiale des conséquences du changement climatique sur les vignobles à différents niveaux d'échelle, l'évolution de la géographie viticole avec pertinence ? De nombreuses d'études identifient les nouveaux espaces disponibles qu'offre le changement climatique (Fraga et al., 2013 ; Hannah et al., 2013 ; Morales-Castilla et al., 2020 ; Moriondo et al., 2013 ; Sgubin et al., 2023). Il s'agit trivialement de secteurs où la température n'était pas suffisamment élevée pour permettre au raisin d'atteindre un niveau de maturité suffisant. Bien sûr, d'autres éléments du climat sont à considérer (et sont considérés dans les travaux évoqués), mais d'une manière générale, les réchauffements contemporain et futur ouvrent des perspectives pour la viticulture vers de plus hautes latitudes et altitudes (encadré I-9-2).

Encadré I-9-2. Le potentiel climatique de régions viticoles émergentes : le cas de la Bretagne

La faisabilité climatique de la Bretagne pour la viticulture a fait l'objet d'une étude pour illustrer le scénario « nomade » de stratégie d'adaptation de la viticulture au changement climatique (Zavlyanova et al., 2023 ; cf. chapitre II-7). Ce travail a conduit au développement d'une méthodologie d'analyse du potentiel thermique pour la viticulture de régions émergentes, basée sur le calcul des indices de phénologie de la vigne (*Grapevine Flowering Veraison* – GFV, Parker et al., 2011) et de maturité des raisins (*Grapevine Sugar Ripeness* – GSR, Parker et al., 2020). Cette méthodologie est aussi basée sur l'utilisation de dates butoirs pour atteindre le stade véraison et/ou des taux de sucre ciblés afin de répondre à différents objectifs de production (effervescents ou vins secs).

Une cartographie des secteurs potentiellement favorables en Bretagne à une bonne maturité de certains cépages a été réalisée avec les données de projections



•••

climatiques Drias, à différents horizons et selon différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Les résultats montrent que les conditions thermiques de cette région semblent de plus en plus adaptées à l'avenir, en fonction du scénario climatique, de la période future et des types de vin ciblés, comme l'illustre la figure I-9-3. Le développement de la viticulture en Bretagne, rendue possible grâce au changement de régime des droits de plantation*, marque surtout l'ampleur de l'impact du changement climatique dans cette région. La méthodologie d'analyse du potentiel climatique peut être répliquée à toute région viticole émergente, avec la possibilité d'ajuster les choix de variétés, le calendrier et les taux de sucre ciblés pour répondre aux besoins d'une région spécifique.

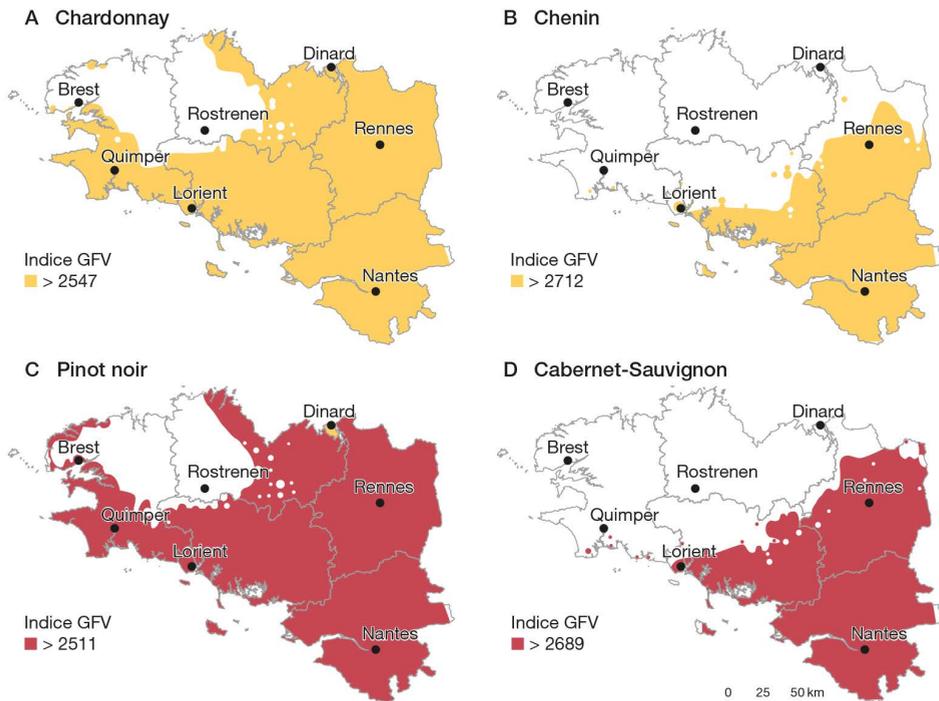


Figure I-9-3. Secteurs en Bretagne où la véraison de quatre cépages (Chardonnay, Chenin, Pinot noir et Cabernet-Sauvignon) serait atteinte au plus tard le 1^{er} septembre, en moyenne, à l'horizon 2031-2060, selon le scénario RCP 4.5 et le modèle CNRM-CM5/RCA4. D'après Zavlyanova et al., 2023.

* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/jo/2015/12/31/0303>.

Il semble en revanche plus délicat de cibler les régions pour lesquelles la viticulture ne sera plus viable dans les prochaines décennies. Tout d'abord, parce que la viticulture s'adapte à une très large gamme de conditions climatiques (Puga et al., 2022). Il est difficile de fixer une limite de climat trop chaud ou trop sec pour y cultiver la vigne, sachant que la viticulture est pratiquée en marge de déserts comme celui de Sonora au Mexique ou d'Atacama au Chili. Par ailleurs, la diversité génétique de la vigne constitue un levier d'adaptation puissant et à ce jour très peu exploité (Morales-Castilla et al., 2020), sans compter les opportunités offertes par la création variétale (Delrot et al., 2020).

Enfin, le recours à l'innovation apparaît comme une volonté forte de la filière pour répondre à l'évolution climatique, tout du moins en France (Ollat et al., 2021). Il semble donc hasardeux de pronostiquer la disparition de certaines régions où la vigne est actuellement cultivée. Cet exercice requiert, pour être pertinent, une approche systémique, comme le CCAF (*Climate Change Adaptation Network*) proposé par Graça et Gishen (2022), qui identifie et met en balance les coûts et bénéfices des stratégies d'adaptation au changement climatique.

On peut toutefois évoquer, sans condamner la viticulture, les pertes de potentialités des vignobles en lien avec le changement climatique. Morales-Castilla et al. (2020) simulent des baisses de 24 à 85% des superficies vitivinicoles actuellement cultivées dans le monde, selon l'intensité du réchauffement futur et la diversification de l'encépagement retenu.

À échelle plus fine, Moriondo et al. (2010) simulent une élévation du potentiel qualitatif dans les secteurs d'altitude supérieure à 600 m jusqu'à la fin du XXI^e siècle, alors que ce potentiel diminuerait à horizon 2050 à plus basse altitude (encadré I-9-3). Cette étude n'intègre toutefois pas la variation spatiale des sols, qui pourrait exacerber ou tamponner les effets du changement climatique à l'échelle locale. Peu d'études ont été menées concernant l'évolution spatiale et temporelle des potentialités viticoles en réponse au changement climatique, intégrant la variabilité spatiale du sol et du climat. La thèse d'Étienne Delay (2015) aborde cependant les conditions humaines de valorisation des vignobles de montagne dans le contexte du changement climatique. La diminution des potentialités viticoles ou les opportunités de relocalisation de la vigne en lien avec la diversité thermique locale sont, elles aussi, peu explorées. Les travaux de Naulleau et al. (2022a), déjà cités plus haut, suggèrent que la relocalisation du vignoble sur certaines parcelles non cultivées situées dans l'aire de production permettrait d'accroître légèrement le potentiel de production. Ces travaux font l'objet du chapitre II-6, dans le présent ouvrage.

Conclusion

La production vitivinicole s'appuie largement sur la notion d'appartenance au lieu, mettant en avant les potentialités offertes par le milieu naturel pour la production de vins aux qualités singulières. Les caractéristiques topographiques, climatiques et géopédologiques constituent le socle de l'environnement dans lequel est cultivée la vigne. Les éléments du paysage, relief et occupation du sol, sont aujourd'hui globalement décrits à très fine échelle. Ce n'est pas nécessairement le cas du sol et du climat, dont la prise en compte de la variabilité spatiale reste limitée dans les études d'impact et d'adaptation au changement climatique, en raison d'un défaut de documentation de ces éléments. Comme nous l'avons vu, la cartographie du sol et du climat dispose d'un cadre méthodologique, tout comme la descente d'échelle des projections climatiques. Les travaux d'analyse spatiale de ces éléments suggèrent que la grande diversité des conditions géopédologiques et climatiques locales constitue un levier d'adaptation puissant au changement climatique. Reste désormais à intégrer, via des analyses systémiques, cette diversité, afin de projeter avec pertinence les conséquences et les modifications potentielles des territoires viticoles en réponse à l'évolution du climat.

Encadré I-9-3. Bénéfices et limites de la montée en altitude comme stratégie d'adaptation

Dans le contexte du changement climatique, les vignobles d'altitude font l'objet de plus en plus d'intérêt de la part de la communauté scientifique et des professionnels comme solutions d'adaptation (Arias *et al.*, 2022; fig. I-9-4). La notion d'altitude est variable : entre 350 m dans la vallée du Douro (Portugal) et près de 3000 m en Chine. Dans ces conditions, l'environnement est caractérisé par des températures plus faibles (environ $-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$), mais une amplitude thermique plus importante (environ $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$), une pression atmosphérique réduite et plus d'échanges radiatifs globaux, avec une part plus importante de rayonnement ultraviolet (UV). Les impacts sur la phénologie de la vigne ont été estimés pour différents cépages, dans la région du Trento en Italie, à environ 7 jours de retard de date de récolte pour 100 m d'élévation, mais avec un effet plus marqué du réchauffement climatique sur l'avancée des stades en altitude (Alikadic *et al.*, 2019). Les températures plus faibles peuvent augmenter les risques de gel et globalement réduire les capacités d'assimilation du carbone. Elles peuvent cependant favoriser une maturation lente, un maintien de l'acidité et une accumulation des composés phénoliques. Le rayonnement UV affecte aussi les capacités de croissance, réduit la taille des baies et a un effet bénéfique sur l'accumulation de composés antioxydants, de monoterpènes et de polyphénols. Cet effet permet de réduire le décalage entre accumulation des sucres et des anthocyanes constaté lorsque les températures augmentent (Martinez-Lüscher *et al.*, 2016). Dans certains vignobles, des problèmes de vent peuvent limiter l'intérêt de la montée en altitude.



Figure I-9-4. Les vignobles Tsiakkas à Chypre sont situés entre 700 et 1 440 m d'altitude.

© Élixa Marguerit, Bordeaux Sciences Agro.

PARTIE 2

Coconstruire des stratégies pour l'adaptation

PERCEPTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ADAPTATION DES VITICULTEURS

Etienne Neethling et James Boyer

Introduction

Pour une production de vin orientée vers la qualité, la relation étroite entre le climat et la vigne a toujours conduit les viticulteurs à ajuster leurs pratiques. Dès la plantation, ceux-ci cherchent à adapter un itinéraire technique à chaque parcelle. Au cours de la maturation, ils suivent de très près l'évolution de la composition des raisins, puis adaptent au mieux la gestion des vinifications pour exprimer le potentiel qualitatif de leur vendange. Mais dans les différentes régions viticoles du monde, le changement climatique modifie les stades phénologiques de la vigne et la composition des raisins (Van Leeuwen *et al.*, 2019). Confrontés à ces impacts, les viticulteurs doivent à nouveau repenser leurs pratiques et stratégies vitivinicoles. La vigne est une plante pérenne dont la durée de vie peut correspondre à deux générations de viticulteurs. Les décisions prises aujourd'hui auront donc des conséquences sur plusieurs décennies. Dans ce contexte, il paraît essentiel de s'intéresser à la perception des viticulteurs vis-à-vis des évolutions et aléas climatiques, des pratiques qu'ils mettent en œuvre pour y faire face, et des stratégies d'adaptation envisagées où l'innovation trouve une place particulière. En nous appuyant sur trois enquêtes conduites en France et à l'international dans le cadre du projet Laccave, nous présentons dans ce chapitre comment les viticulteurs perçoivent le changement climatique et ses impacts dans différents contextes, puis comment ils envisagent des stratégies d'adaptation à plusieurs échelles temporelles et spatiales, et enfin quels peuvent être les déterminants de ces stratégies et innovations.

Perception à l'échelle internationale du changement climatique et de ses impacts sur la viticulture

La perception par les viticulteurs du changement climatique et de ses effets sur la vigne a été abordée dès le début des années 2000 (Battaglini *et al.*, 2009). Sa prise en compte est essentielle pour comprendre les décisions des viticulteurs et évaluer la vulnérabilité et l'adaptation de leurs exploitations. Plusieurs études ont par la suite permis d'évaluer ces perceptions à l'échelle d'un vignoble local (Lereboullet *et al.*, 2013; Neethling *et al.*, 2017). Mais pour en avoir une vision plus globale, une enquête a été menée en 2019 et 2020 à l'échelle internationale dans le cadre du projet Laccave.

Une enquête conduite dans 18 pays viticoles

Créé à l'aide de Google Forms, un questionnaire électronique a été élaboré et adressé à des viticulteurs de 18 pays producteurs de vin, accompagné d'un message expliquant les objectifs de l'étude. Pour faciliter la compréhension des questions, le questionnaire a été traduit dans la ou les principales langues de chaque pays (Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Australie, Autriche, Canada, Chili, Espagne, États-Unis, France, Grande-Bretagne, Grèce, Hongrie, Italie, Japon, Nouvelle-Zélande, Portugal et Suisse). Les viticulteurs ont été contactés individuellement et aléatoirement par courrier électronique ou avec l'aide d'organismes publics et d'associations régionales dans des newsletters ou notifications électroniques. Le questionnaire était totalement anonyme, composé de 21 questions fermées (par ex. perception, impacts observés, priorité des stratégies d'adaptation) et 3 questions ouvertes (par ex. enjeux majeurs, risques climatiques, commentaires sur l'adaptation), d'une durée de réponse estimée à 15 minutes. Entre 2019 et 2020, 3636 questionnaires ont été collectés (fig. II-1-2).

La majorité des viticulteurs interrogés ont constaté un changement climatique au cours des dernières décennies, quel que soit le pays considéré. Sur l'ensemble de la population étudiée, 85% des viticulteurs sont conscients d'un changement climatique, avec seulement 4% qui ne remarquent aucune modification. Le niveau de perception varie selon les pays questionnés (fig. II-1-1), de 68% pour la Grande-Bretagne à 94% pour l'Allemagne. En France, 84% des viticulteurs interrogés ont remarqué une évolution climatique, avec une variation selon les régions, de 76% pour Bordeaux à 89% pour le Val de Loire.

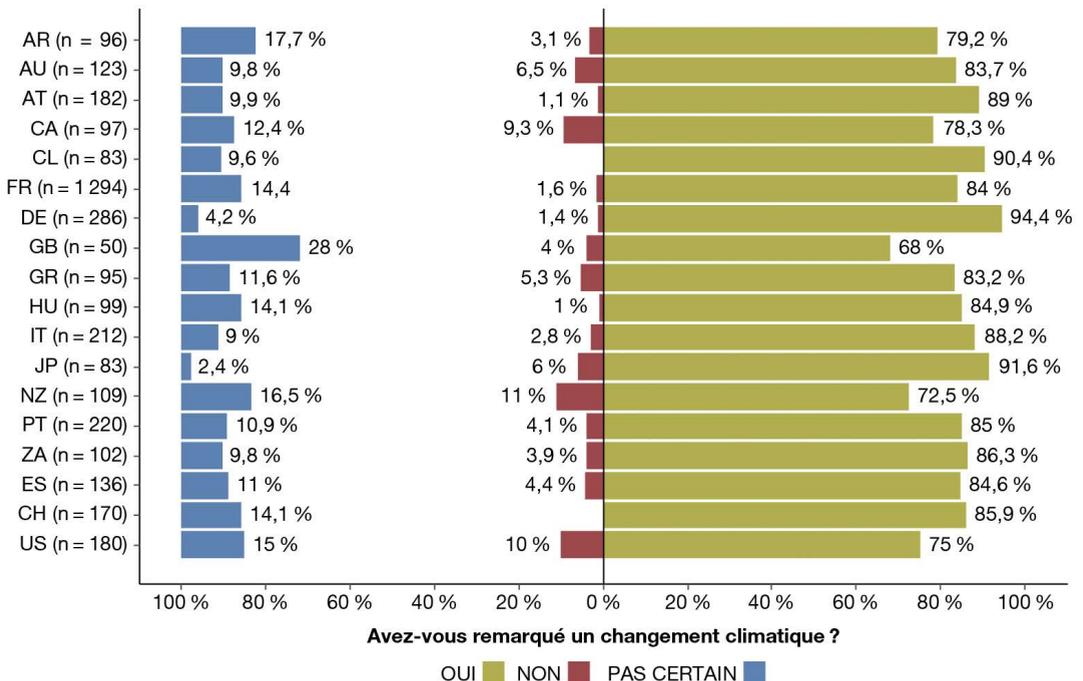


Figure II-1-1. Niveau de perception du changement climatique des viticulteurs interrogés dans les 18 pays viticoles (n = nombre de réponses).

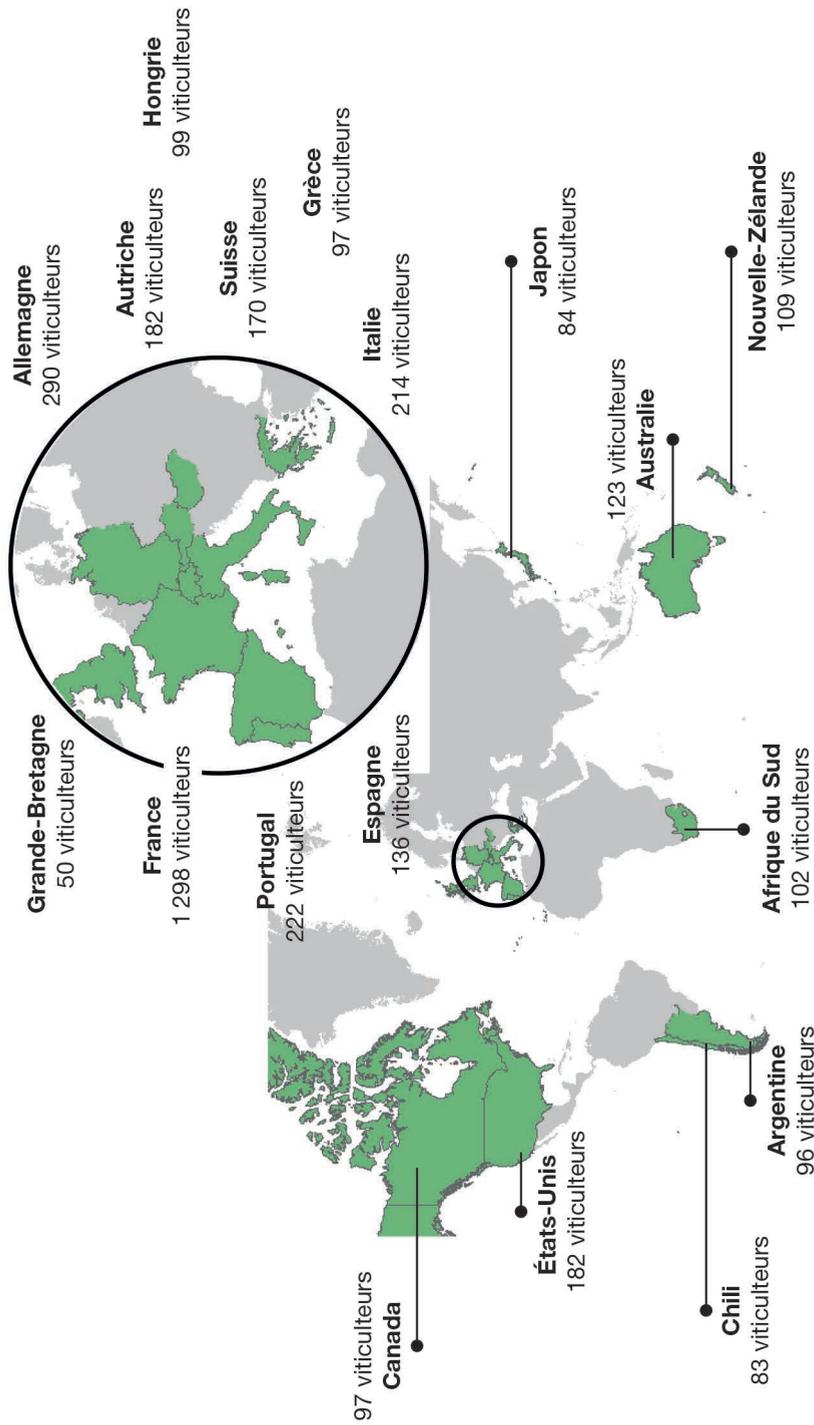


Figure II-1-2. Nombre de questionnaires collectés pour les 18 pays enquêtés.

À l'échelle internationale, les modifications les plus notables pour les viticulteurs conscients du changement climatique sont la hausse des températures hivernales et estivales, ainsi que l'augmentation de la sécheresse. Des évolutions spécifiques aux pays sont exprimées, par exemple l'augmentation des événements de gel pour l'Autriche et la Suisse, celle des tempêtes de grêle pour la Hongrie et l'Italie, des précipitations hivernales pour le Canada et la Grande-Bretagne, ou encore des précipitations estivales pour le Japon. Des changements spécifiques sont également perçus entre régions viticoles en France, comme l'augmentation des événements de gel pour le Val de Loire et Bordeaux, ou celle des tempêtes de grêle pour Bordeaux et la Provence. Une autre enquête conduite en 2021 auprès des organismes de défense et de gestion de Nouvelle-Aquitaine confirme ces constats (Gouty-Borgès et al., 2022).

Des impacts perçus partout, mais différemment selon les pays et les régions

Les viticulteurs perçoivent les impacts de ce changement climatique sur le comportement de la vigne (tableau II-1-1). Hormis au Canada, la majorité des viticulteurs des pays interrogés ont observé une avancée des stades phénologiques, comme 85 % des viticulteurs français. Le changement climatique est perçu comme la cause d'une baisse des rendements dans dix pays, en France (65 %) mais surtout au Chili (81 %) et en Afrique du Sud (82 %). Dans cinq pays, la majorité des viticulteurs ne perçoivent pas d'effets sur les rendements et, en Grande-Bretagne, 67 % d'entre eux indiquent au contraire un effet positif. En France, les résultats montrent que les viticulteurs perçoivent très largement une baisse de rendement dans les régions méditerranéennes — Provence (85 %) et Languedoc-Roussillon (91 %) —, contre près de la moitié dans les régions septentrionales.

Selon les viticulteurs interrogés, la teneur en sucres des raisins est le paramètre le plus affecté par le changement climatique en période de maturation. Son augmentation est perçue comme plus importante dans les pays traditionnels, comme la France (90 %), contrairement aux pays du Nouveau Monde, comme la Nouvelle-Zélande (41 %). Concernant les maladies de la vigne, les résultats sont plus variés. Des pays comme la Hongrie, le Japon ou la Nouvelle-Zélande perçoivent un effet sur l'augmentation en la matière, mais pas l'Argentine. Plus globalement, des pays comme l'Espagne soulignent des effets néfastes sur la qualité du vin, contrairement à des pays comme la Grande-Bretagne qui perçoivent plutôt une influence bénéfique. Ces différences s'expriment également en France (fig. II-1-3). Le changement climatique apparaît beaucoup plus bénéfique en Champagne (pour plus de la moitié des viticulteurs) qu'en Languedoc-Roussillon, où ses impacts sont perçus négativement par 45 % des viticulteurs. Toutefois, un grand nombre de viticulteurs expriment à la fois des effets négatifs et bénéfiques du changement climatique, soulignant l'importance de comprendre les différents processus et facteurs qui jouent sur la vulnérabilité locale de la viticulture. Par exemple, le réchauffement estival peut être bénéfique pour la viticulture et la maturation des raisins dans une région septentrionale telle que le Val de Loire, alors que des printemps plus chauds y entraînent un débourrement précoce, exposant les vignes à un risque plus important de gel printanier.

Tableau II.1-1. Perception par les viticulteurs des impacts du changement climatique sur le comportement de la vigne (n = nombre de réponses). a. oui, la phénologie est avancée ↓; non ↔; oui, la phénologie est retardée ↑. b : oui, le rendement est moins élevé ↓; non ↔; oui, le rendement est plus élevé ↑. c : oui, la teneur en sucre plus faible ↓; non ↔; oui, la teneur en sucre est plus élevée ↑. d : oui, moins de maladies sont constatées ↓; non ↔; oui, plus de maladies sont constatées ↑.

	Phénologie ^a			Rendement ^b			Maturité ^c			Maladies ^d						
	n	↓	↔	↑	n	↓	↔	↑	n	↓	↔	↑				
Afrique du Sud	88	67%	14%	19%	88	82%	15%	3%	88	27%	24%	49%	88	24%	33%	43%
Allemagne	263	93%	2%	5%	264	55%	37%	8%	266	2%	4%	94%	264	23%	42%	34%
Argentine	76	62%	12%	26%	76	65%	28%	8%	75	20%	19%	61%	75	20%	57%	23%
Australie	99	81%	7%	12%	101	64%	32%	4%	98	8%	23%	68%	102	45%	38%	17%
Autriche	160	90%	7%	3%	161	42%	53%	5%	161	1%	14%	84%	160	28%	45%	27%
Canada	76	37%	28%	36%	76	38%	49%	13%	75	36%	31%	33%	75	9%	31%	60%
Chili	75	84%	8%	8%	74	81%	12%	7%	75	11%	13%	76%	75	24%	43%	33%
Espagne	113	89%	1%	11%	112	62%	33%	5%	113	6%	4%	89%	113	30%	38%	32%
États-Unis	129	55%	26%	19%	131	27%	48%	25%	128	25%	31%	44%	130	7%	41%	52%
France	1068	85%	5%	10%	1078	61%	29%	10%	1069	2%	7%	90%	1063	27%	43%	30%
Grande-Bretagne	33	73%	21%	6%	33	6%	27%	67%	33	9%	15%	76%	33	21%	36%	42%
Grèce	79	66%	8%	27%	79	51%	43%	6%	79	15%	20%	65%	79	9%	28%	63%
Hongrie	84	92%	2%	6%	84	38%	55%	7%	84	5%	13%	82%	83	8%	20%	71%
Italie	187	78%	9%	13%	184	57%	40%	3%	186	14%	20%	66%	186	15%	36%	49%
Japon	76	78%	21%	1%	76	32%	65%	4%	76	34%	47%	18%	76	4%	22%	74%
Nouvelle-Zélande	78	73%	15%	12%	77	25%	55%	21%	79	10%	49%	41%	79	8%	18%	75%
Portugal	186	84%	6%	10%	186	65%	28%	6%	187	20%	18%	62%	186	17%	26%	57%
Suisse	146	89%	7%	4%	145	42%	50%	8%	144	3%	10%	87%	145	14%	43%	43%

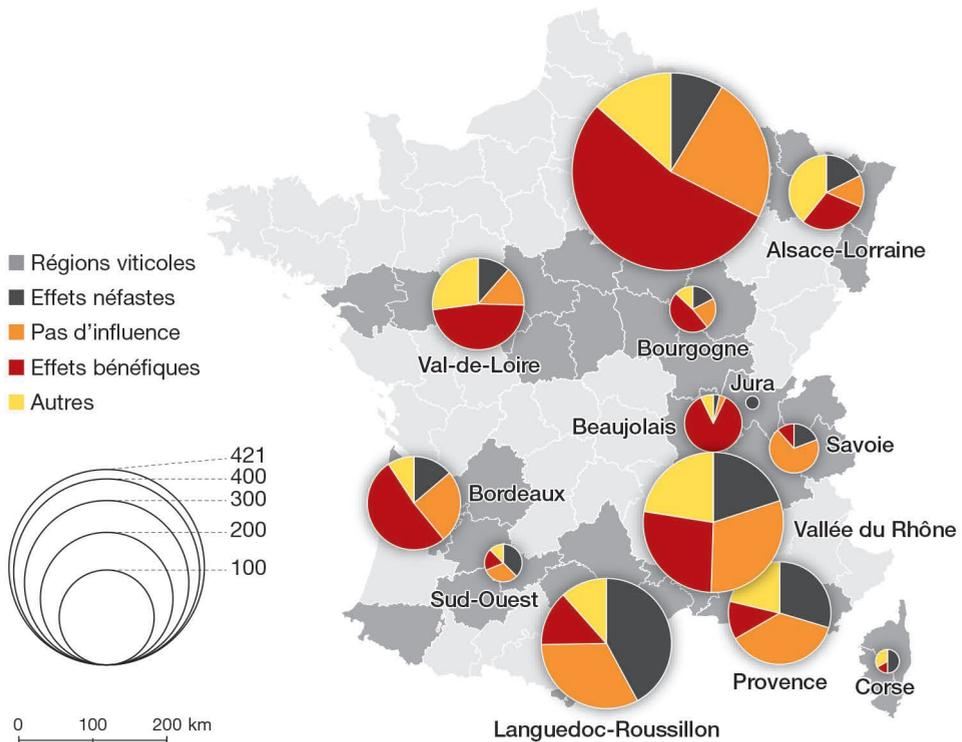


Figure II-1-3. Niveau de perception des viticulteurs interrogés en France par rapport aux effets néfastes ou bénéfiques du changement climatique sur la qualité du vin (la taille du cercle indique le nombre de réponses par région).

Stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles et spatiales

Presque tous les viticulteurs interrogés dans les différents pays (85%) estiment que le climat continuera à changer au cours du xxi^e siècle. Mais face aux impacts attendus, la priorité d'adaptation des pratiques viticoles varie fortement d'un pays à l'autre.

Des priorités d'adaptation variables selon les pays et régions

Des pays positionnent leur urgence sur des pratiques pérennes, comme le choix du cépage au Portugal et en Afrique du Sud, la localisation des plantations en Espagne et aux États-Unis, ou encore les systèmes d'irrigation au Chili et en Australie. D'autres pays, comme le Japon ou la Nouvelle-Zélande, donnent la priorité à la gestion des maladies. La Hongrie, elle, se concentre sur les pratiques liées à la vendange, alors que des pays comme la France ou l'Italie considèrent globalement les pratiques de gestion du sol comme prioritaires. En France, les leviers d'adaptation varient aussi fortement d'une région à l'autre. Par exemple, les viticulteurs champenois mettent en avant la gestion des maladies et de la vendange, alors qu'en Languedoc-Roussillon l'urgence se porte sur le

choix du cépage et du porte-greffe ou sur l'irrigation. Ces résultats mettent en évidence que plusieurs stratégies d'adaptation sont possibles, dépendantes de la diversité et de la complexité du contexte local.

Cette diversité de perceptions pour l'adaptation exprime des différences dans les conditions climatiques et les caractéristiques de chaque vignoble. Les études contextualisées de la vulnérabilité au changement climatique sont donc indispensables pour comprendre et envisager des stratégies d'adaptation à différentes échelles spatiotemporelles. Cela est extrêmement important en viticulture, car la qualité du vin est étroitement liée aux caractéristiques spécifiques de l'environnement géographique.

Une enquête sur l'évolution des pratiques dans le vignoble Anjou-Saumur

Dans le cadre du projet Laccave, une autre enquête a ainsi été conduite à l'échelle locale en 2012 et 2013, en Anjou-Saumur (Neethling *et al.*, 2017). Elle a montré que les pratiques culturelles et les stratégies viticoles ont déjà beaucoup évolué au cours des 30 dernières années, notamment le mode d'entretien du sol entre les rangs de vignes (interrangs) (fig. II-1-4). Durant les années 1970, la pratique la plus courante était le désherbage chimique total. Puis dans les années 1990, les viticulteurs ont adopté progressivement l'enherbement permanent pour des raisons économiques ou liées à une prise de conscience environnementale. La pratique consistait à maintenir un couvert végétal dans les interrangs pour limiter l'érosion et permettre une meilleure maîtrise de la vigueur, de l'incidence des maladies et du rendement. Lorsque la vigueur de la vigne est maîtrisée et réduite, les raisins sont plus riches en sucre et en composés phénoliques, avec un niveau d'acidité plus faible (Neethling *et al.*, 2017).

Depuis les années 2000, la fréquence d'années chaudes et sèches a augmenté, et les vigneron en Anjou-Saumur ont mis en œuvre un enherbement maîtrisé pour ajuster le pourcentage de couverture du sol et le type de couvert aux conditions édaphiques de la parcelle et aux conditions climatiques de l'année. Cette évolution s'est traduite par un meilleur raisonnement pour le mode d'entretien du sol approprié à chaque parcelle. Cet exemple de l'évolution de l'entretien du sol montre la nature dynamique des pratiques culturelles et des stratégies viticoles, et en particulier les capacités d'adaptation des viticulteurs, acquises grâce à leur expérience et leurs connaissances (Neethling *et al.*, 2017). Il ressort de cela que le facteur climatique est régulièrement pris en compte pour l'adaptation, mais qu'il n'est pas le seul. Le viticulteur agit sur son environnement local dans un contexte socioéconomique et réglementaire en constante évolution. Les tendances futures des pratiques et stratégies viticoles seront conditionnées par de nombreux facteurs, à la fois climatiques et non climatiques.

Des actions envisagées à court, moyen et long termes

Face aux impacts actuels et futurs du changement climatique, quelles sont les stratégies d'adaptation à mettre en œuvre à différentes échelles spatiotemporelles? Les travaux conduits il y a dix ans déjà dans le cadre du projet Laccave montrent que même si la majeure partie des viticulteurs d'Anjou-Saumur a noté un changement climatique (Neethling *et al.*, 2017), la perception de son évolution future est marquée par beaucoup d'incertitudes. Les adaptations qu'ils envisagent portent principalement sur les pratiques

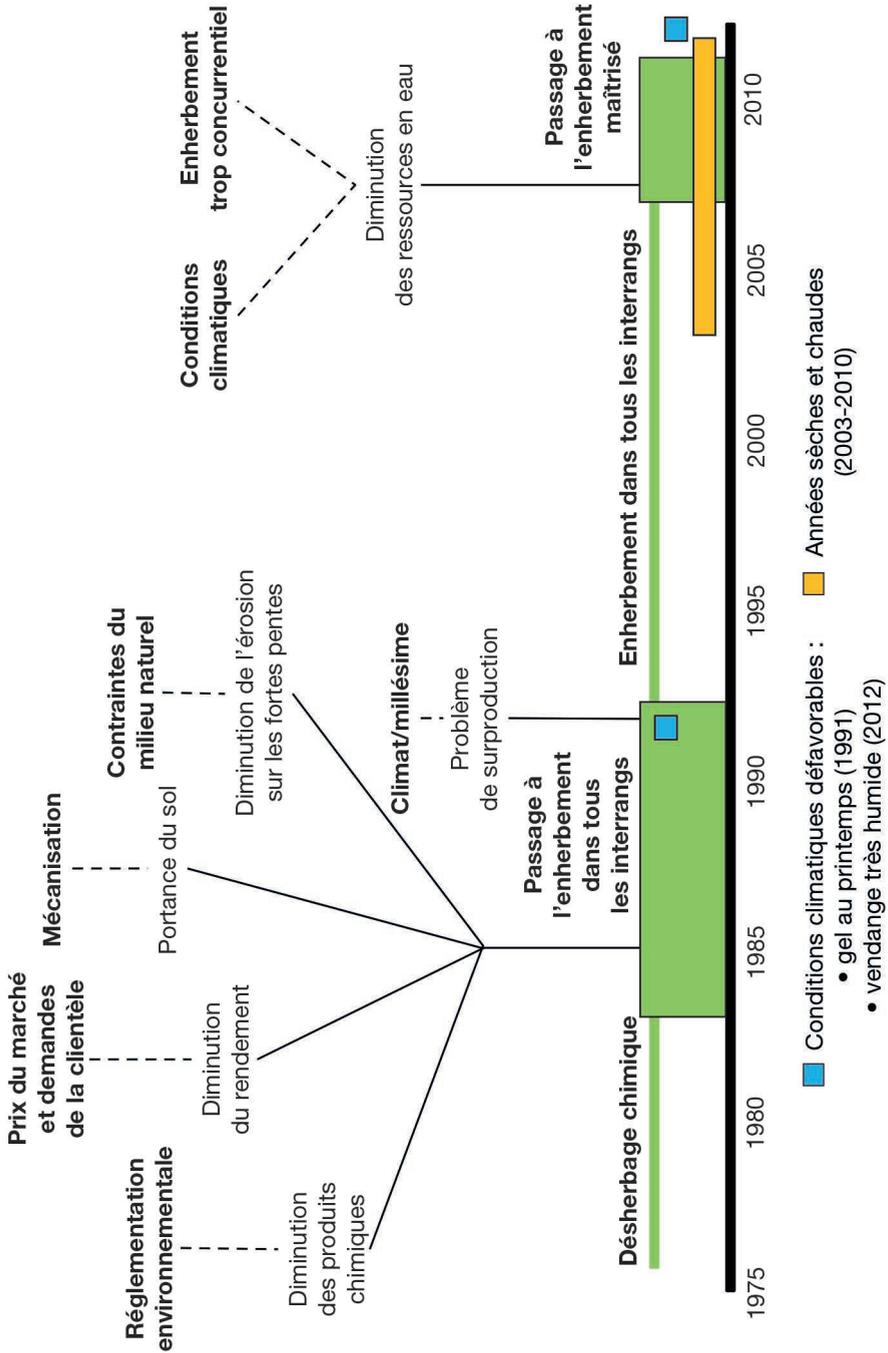


Figure II-1-4. Évolution de l'entretien du sol dans les interrangs en Anjou-Saumur. Source : Petitjean, 2013.

annuelles : date et moment de la vendange, transport des raisins à la cave, maîtrise des fermentations, protection phytosanitaire, entretien du sol, etc. Les progrès réalisés ces dernières années dans la mise au point d'outils mécaniques de précision facilitent grandement l'organisation du travail pour intervenir dans les conditions les plus propices.

Les stratégies à moyen terme peuvent être mises en place à travers le choix d'une taille visant à modifier l'architecture de la vigne ou à l'occasion de plantations nouvelles. La principale évolution constatée en Anjou-Saumur est le choix du porte-greffe, rendu possible grâce à une meilleure connaissance des propriétés du sol. De leur côté, les stratégies à long terme dépendent de l'évolution de la réglementation et font l'objet de discussions, même si certaines comme l'irrigation ont déjà leur place dans le vignoble méditerranéen. Le changement de cépages (ou de clones) provenant de l'étranger ou d'autres régions viticoles privilégie des caractères de durée de cycle, besoins thermiques, plus grande tolérance à la contrainte hydrique, ou encore, maturité atteinte à un degré alcoolique potentiel faible à modéré. Ces cépages (ou clones) déjà cultivés ailleurs bénéficient de solides références concernant leur comportement agronomique (par ex. Chenin cultivé en Afrique du Sud).

À partir de l'enquête conduite auprès des viticulteurs d'Anjou-Saumur, il est possible de classer les stratégies d'adaptation à différentes échelles temporelles (fig. II-1-5), sachant que, dans le détail, elles diffèrent selon la nature du sol, le matériel végétal et le système de commercialisation, d'où l'intérêt des études aux échelles locales. Qu'elles soient à court ou long terme, les adaptations se raisonnent aussi à différentes échelles spatiales. Un viticulteur possède généralement plusieurs parcelles de vigne qui présentent souvent des conditions édaphiques et climatiques variées, même à l'échelle d'un petit territoire.

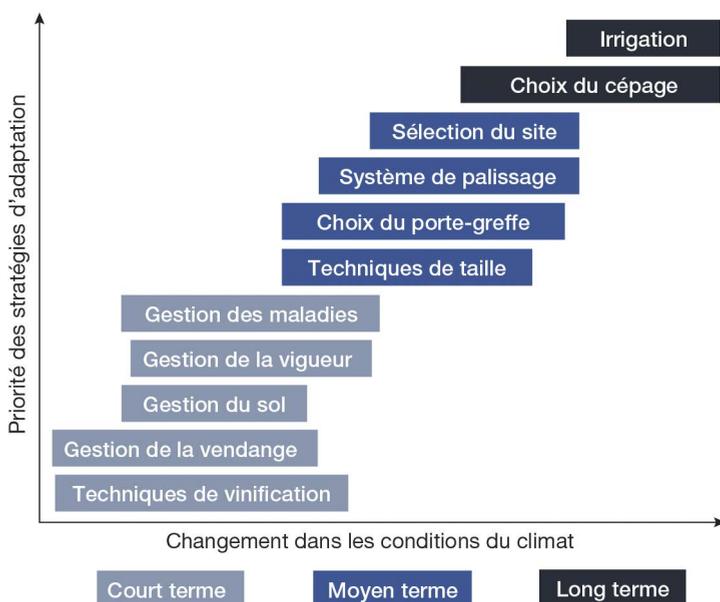


Figure II-1-5. Stratégies d'adaptation envisagées par les viticulteurs en Anjou-Saumur à court, moyen et long termes, en réponse au changement climatique. Source : Neethling et al., 2017, adapté de Nicholas et Durham, 2012.

La réalisation de certaines pratiques annuelles n'a donc pas toujours lieu sur toutes les parcelles et en même temps (Barbeau *et al.*, 2015). Une exploitation viticole s'insère dans un territoire où sont présents d'autres vigneron et d'autres acteurs concernés par l'évolution des pratiques. Certains choix doivent donc être concertés, particulièrement dans le cadre de caves coopératives ou des appellations.

Il est cependant fort probable que, selon les contraintes réglementaires et environnementales, des innovations non encore imaginées actuellement apparaîtront au cours des prochaines décennies et feront évoluer les pratiques agronomiques à long terme dans des directions difficiles à prévoir aujourd'hui. Il est donc important de questionner la place des innovations dans le processus d'adaptation et d'analyser les conditions de leur adoption.

L'innovation au cœur de l'adaptation des viticulteurs au changement climatique

Beaucoup de travaux mettent en effet l'innovation au cœur de l'adaptation au changement climatique, dans différents secteurs économiques (Rodima-Taylor *et al.*, 2012). L'innovation renvoie à la mise en œuvre d'un produit (bien ou service) ou d'un procédé (de production) nouveau ou sensiblement amélioré, d'une nouvelle méthode de commercialisation ou d'une nouvelle méthode organisationnelle dans les pratiques d'une entreprise (OCDE, 2005). Les enjeux du réchauffement climatique sont nouveaux et nécessitent donc de la créativité, à la fois pour produire des innovations et pour les intégrer dans un système de production (Simonet, 2010).

Des innovations techniques et organisationnelles

L'adaptation suppose des changements techniques ou technologiques. S'inspirant de l'histoire de la vigne et du vin et de la façon dont ce secteur a su surmonter des crises importantes, comme celle du phylloxera, beaucoup pensent que l'adaptation des viticulteurs au changement climatique réside avant tout dans l'innovation technique (Aigrain *et al.*, 2016), dans différents domaines porteurs de solutions (par ex. créations variétales, techniques œnologiques, irrigation goutte à goutte, numérique...) (Ollat *et al.*, 2016). Mais ces innovations peuvent être aussi organisationnelles (modification des routines, pratiques et relations dans l'entreprise), institutionnelles (nouvelles règles et institutions) ou de produit (nouveau vin, par ex.). Elles peuvent également être incrémentales ou radicales.

La prospective réalisée dans le cadre du projet Laccave suggère que l'innovation est considérée comme déterminante pour le scénario privilégié par les viticulteurs (cf. chapitre II-7). Ceux-ci veulent « innover pour rester », à cause des investissements qu'ils ont réalisés dans leur territoire viticole et qui jouent sur la qualité et la réputation du produit. Dans le cadre de cette prospective et d'entretiens réalisés avec 42 responsables d'organisations viticoles dans 7 régions (Boyer, 2016b), les différents domaines d'innovation ont été précisés :

- le matériel végétal (porte-greffes, cépages, clones ou hybrides plus tardifs, résistants à une hausse de température, plus tolérants à la sécheresse, produisant plus d'acide et moins de sucre...);

- la conduite du vignoble à la parcelle, incluant la taille (plus d’ombrage sur les grappes), la gestion du feuillage (pour limiter l’évapotranspiration...), la gestion du sol (couvert ou amendement organique) ou plus globalement la redéfinition des itinéraires techniques ;
- la gestion de la contrainte hydrique sur la parcelle par la mise en place d’une irrigation de précision, l’agroforesterie, le *design* paysager... ;
- les opérations œnologiques, avec des innovations permettant de limiter le taux d’alcool (microfiltration par membranes, choix de levures...), de mieux contrôler la température, réduire les risques d’oxydation des moûts, ajuster l’acidité du vin, orienter les profils aromatiques ;
- la réorganisation des activités et relations au sein de l’entreprise viticole (organisation du travail, compétences) ou dans ses relations externes (systèmes d’alerte, assurance, conseil, gestion de l’eau...);
- le développement de nouveaux vins, mais aussi d’autres productions agricoles ou de services qui permettent de saisir des opportunités liées au changement climatique ou de renforcer la résilience de l’entreprise (diversification face au risque...).

Ces innovations peuvent s’inscrire dans une perspective de substituabilité ou de complémentarité. On peut parler de substituabilité quand par exemple les procédés œnologiques viennent corriger les effets du changement climatique sur les caractéristiques du raisin, et cela jusqu’à un certain seuil. Au-delà de ce seuil, une stratégie de complémentarité est nécessaire en combinant les innovations œnologiques, viticoles et organisationnelles, face à des effets plus marqués du changement climatique. D’où l’intérêt de dépasser une approche par innovation élémentaire pour étudier des innovations systémiques ou des systèmes vitivinicoles innovants.

Des innovations qui dépendent des trajectoires et relations de conseil des viticulteurs

L’adaptation des entreprises viticoles au changement climatique dépend donc des caractéristiques des vignobles, mais les ressources, les réseaux et les trajectoires individuelles des viticulteurs peuvent être aussi des facteurs déterminants, comme le mentionnent des travaux sur d’autres enjeux que le changement climatique (Chiffolleau, 2005 ; Campagnone, 2014). Une enquête menée auprès de 87 viticulteurs produisant des vins dans les aires d’appellation de Bordeaux, du Languedoc et de Champagne a ainsi permis d’identifier les facteurs qui influencent leurs perceptions du changement climatique et les innovations mises en œuvre (Boyer, 2016a ; Boyer et Touzard, 2021). Ces facteurs peuvent être d’abord directement associés au viticulteur et à son exploitation :

- dans les trois vignobles enquêtés, la taille (surface, chiffre d’affaires) et la dynamique économique des domaines viticoles n’influencent pas la perception du changement climatique par le viticulteur, ni ses décisions d’innover pour s’adapter. Dans un contexte d’incertitude, ce sont d’autres facteurs qui comptent ;
- le nombre d’années d’expérience et le niveau de formation du viticulteur jouent positivement à la fois sur sa capacité à percevoir les effets du changement climatique et sur sa décision d’innover face à ce changement. L’enquête montre ainsi un effet d’apprentissage par la pratique, à travers la construction de références sur la variabilité et le changement climatiques, nécessaires pour percevoir des tendances ou une occurrence plus élevée d’évènements climatiques. Elle met

- aussi en évidence le niveau de formation qui peut jouer sur l'ouverture du viticulteur et sa capacité à intégrer des connaissances scientifiques pour l'adaptation ;
- les viticulteurs qui ont l'habitude de participer à des salons professionnels ou à des événements liés aux innovations du secteur perçoivent mieux les effets du changement climatique que ceux qui n'y participent pas. Cet indicateur peut exprimer des caractéristiques individuelles plus difficilement analysables, comme la curiosité, l'ouverture aux nouveautés ou encore un sens du marketing et de la communication ;
 - l'engagement du viticulteur dans la production biologique est aussi un facteur qui influence les décisions d'adaptation, rejoignant les résultats d'autres travaux, par exemple en Californie, qui montrent que l'enjeu climatique est associé à celui de l'environnement, et à une approche plus systémique du changement (Levy et Lubell, 2018).

Mais au-delà de ces caractéristiques individuelles, l'enquête révèle que l'adaptation des viticulteurs au changement climatique est aussi liée aux relations qu'ils entretiennent avec d'autres acteurs, des organisations et des institutions qui accompagnent l'innovation viticole à l'échelle nationale et surtout régionale (Boyer et Touzard, 2021). Ces relations s'inscrivent dans un « système d'innovation » ayant des composantes régionales et sectorielles (Cooke *et al.*, 1997 ; Malerba, 2002). Le concept de système d'innovation met en effet en relief le rôle des institutions, réseaux d'acteurs et bases de connaissances dans les processus d'innovation, à côté des facteurs internes des entreprises (cf. chapitre II-3). L'enquête montre l'importance des relations des viticulteurs aux acteurs du système d'innovation, avec des convergences ou différences régionales (fig. II-1-6) :

- dans les trois vignobles, les viticulteurs qui ont des relations de conseil avec les chambres d'Agriculture ou l'interprofession, mais aussi ceux qui accueillent des stagiaires, déclarent être davantage engagés dans l'adaptation au changement climatique ;
- on observe aussi une forte convergence entre les viticulteurs des trois vignobles, d'une part pour solliciter les laboratoires œnologiques pour des solutions visant à corriger les effets du changement climatique sur le vin, d'autre part pour solliciter leurs fournisseurs pour le choix du matériel végétal innovant ;
- il existe toutefois une forte variabilité entre les régions pour les acteurs sollicités dans les autres domaines d'innovation ;
- en Champagne, les liens avec l'interprofession (Comité Champagne) sont multiples et prédominants. C'est l'acteur principal vers lequel les viticulteurs déclarent se tourner pour s'adapter au changement climatique, quel que soit le domaine d'action, sauf pour les pratiques œnologiques ;
- les échanges de conseils entre viticulteurs jouent un rôle plus important dans le vignoble languedocien, surtout dans les domaines de la conduite du vignoble et du matériel végétal.

Le cadre institutionnel de chaque région viticole constitue donc un important levier pour accompagner un processus d'adaptation basé sur l'innovation. Les institutions peuvent réduire les incertitudes sur les coûts de l'adaptation et le risque de mal-adaptation, en fournissant des informations, des normes et un cadre légal pour le développement d'innovations. Le secteur vitivinicole est de fait encadré dans un ensemble très dense d'institutions qui peuvent conduire à une certaine rigidité par rapport à une accentuation des conséquences du changement climatique (Sébillotte *et al.*, 2003). Cette « armature

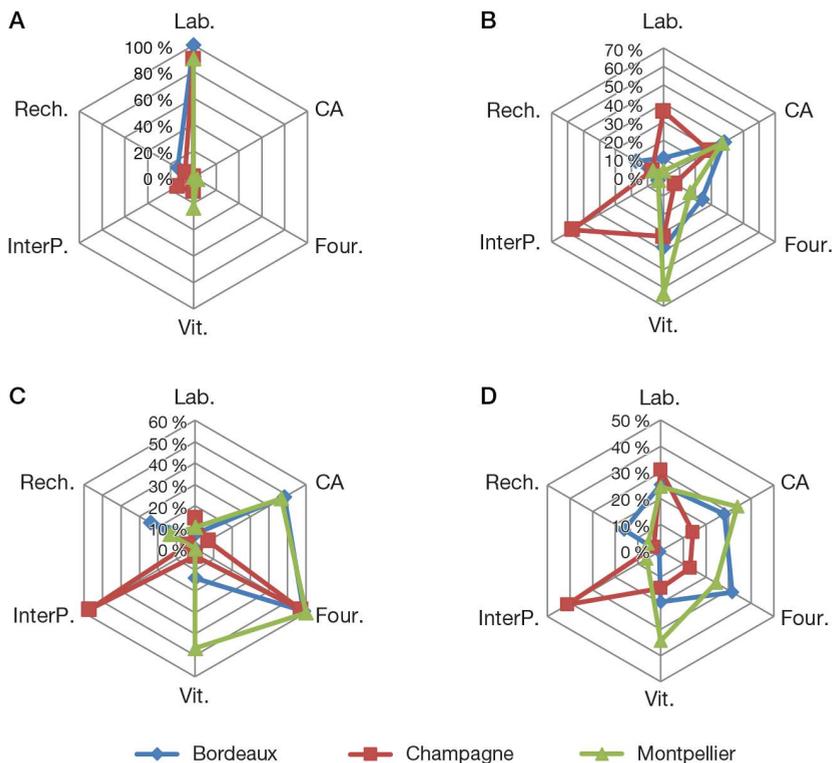


Figure II-1-6. Acteurs du système d'innovation que les viticulteurs décident de solliciter pour innover dans le domaine œnologique (A), de la conduite du vignoble (B), du matériel végétal (C). Perception de l'importance des acteurs du système d'innovation dans l'adaptation au changement climatique (D). Lab. : laboratoires œnologiques; Rech. : instituts de recherche; InterP. : interprofessions; Vit. : viticulteurs; Four. : fournisseurs; CA : chambres d'Agriculture. Source : Boyer James, 2016.

institutionnelle» (Boyer et Touzard, 2016) s'agence à différentes échelles, révélées par l'enquête : au niveau local (syndicats, coopératives et cahiers des charges AOP); au niveau régional (ODG, Interprofessions, chambres d'Agriculture, salons...); aux niveaux national (Inao...) et international (OIV). Les politiques de recherche et d'innovation aux niveaux national (sectoriel ou non) et régional conditionnent donc l'émergence d'innovations et de nouvelles technologies. Les actions collectives, les formes de coordination des acteurs, les mécanismes d'apprentissage et de partage de connaissances, et le changement de routines au sein des entreprises contribuent également à rendre un environnement favorable à l'adaptation (cf. chapitre II-3).

Conclusion

Nous nous sommes intéressés ici à la perception des viticulteurs et à leurs pratiques en réponse aux conditions et aléas climatiques, ainsi qu'aux innovations qu'ils mettent en place pour s'adapter. En 2020, la plupart des viticulteurs, dans tous les vignobles du monde, observent un changement climatique, reconnaissant les évolutions de température et de précipitation, et la croissance des risques associés. Les impacts observés concernent avant

tout l'avancée des stades phénologiques et certaines modifications de la composition des raisins, tandis que les effets sur le rendement et les maladies sont spatialement plus variables. Les viticulteurs enquêtés dans 18 pays affichent une forte conviction que la poursuite du changement climatique est probable, et envisagent de changer leurs systèmes de production avec différentes priorités d'adaptation. Leurs perceptions et options d'adaptation doivent être contextualisées, en prenant en compte les évolutions propres à chaque vignoble local ou régional, mais aussi les facteurs sociaux, économiques et politiques qui conditionnent le fonctionnement des systèmes vitivinicoles.

L'innovation est alors au centre du processus d'adaptation au changement climatique. Elle permet de développer de nouvelles solutions techniques (matériel végétal, conduite du vignoble, œnologie) pour corriger ou anticiper les effets du changement climatique sur la production et la qualité du vin, mais elle concerne aussi de nouvelles pratiques et relations au sein des entreprises viticoles et de leurs territoires (notamment AOC). Dans une période où s'élaborent de nouvelles stratégies d'adaptation, avec de nombreuses incertitudes, l'analyse des facteurs qui influencent les innovations montre l'importance des motivations et trajectoires individuelles des viticulteurs, mais aussi des relations de conseil ou de collaboration qu'ils construisent au sein d'un système d'innovation, avant tout à l'échelle locale et régionale (cf. chapitre II-3).

LE MARCHÉ EST-IL PRENEUR DE VINS MARQUÉS PAR LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE ?

Éric Giraud-Héraud, Alejandro Fuentes Espinoza, Alexandre Pons, Sophie Tempère et Stéphanie Pérès

Introduction

Les évolutions du climat provoquent des changements importants sur la physiologie de la vigne et sur les caractéristiques des vins qui en résultent. En règle générale, des températures élevées sur des périodes prolongées peuvent induire une maturation précoce, voire une surmaturation, avec une augmentation de la teneur en sucres, et une modification des arômes et des saveurs. Les vins issus de raisins ayant de telles caractéristiques sont en général plus alcoolisés et présentent une faible acidité (Webb *et al.*, 2008; De Orduna, 2010). Les vins rouges sont, par exemple, systématiquement marqués par des nuances caractéristiques de fruits confiturés (Pons *et al.*, 2017; Allamy *et al.*, 2018) rappelant ainsi l'expression aromatique traditionnelle des vins élaborés sous les latitudes plus chaudes et sèches que les vignobles en secteur tempéré. Cette hypothèse a été également argumentée par de nombreux auteurs pour qui les « attributs sensoriels généralement souhaitables » du vin, concernant la couleur, les arômes et les caractéristiques gustatives, seront modifiés justement à cause du réchauffement climatique (Duchêne *et al.*, 2010; Fuentès González-Barreiro *et al.*, 2015).

L'économiste rétorquera que cette évolution des caractéristiques des vins, liée au réchauffement climatique, pourrait en fait conduire à une évolution recherchée sur certains marchés. Beaucoup d'observateurs ont en effet su faire remarquer que les vins produits aujourd'hui n'ont, pour un grand nombre de régions viticoles, jamais été aussi bons et équilibrés. Et du reste, certaines pratiques culturelles, comme l'effeuillage sévère de la zone des grappes ou des vendanges en vert trop poussées, sont de fait utilisées pour améliorer la maturation du fruit, en accentuant les nuances de fruits confiturés (Van Leeuwen *et al.*, 2022). Les effets sont alors similaires à ceux produits par le réchauffement climatique, mais ces vins sont délibérément produits avec l'objectif de répondre aux attentes de leur clientèle. Les vins surmûris sont ainsi depuis longtemps présents dans les linéaires, ce qui veut dire qu'ils répondent, ou à tout le moins répondaient, peu ou prou à certaines attentes de consommateurs. Au final, on pourrait conclure que le réchauffement climatique est en réalité une aubaine pour certains producteurs, voire pour des régions viticoles entières.

On notera néanmoins que ce qui, hier, était une simple option de production est devenu une contrainte avec laquelle il est nécessaire de travailler. Le réchauffement climatique a entraîné une perte de flexibilité stratégique dangereuse si la demande des marchés

venait à s'orienter en sens inverse. Nous donnons dans ce chapitre des arguments allant dans ce sens, en nous appuyant sur un marché expérimental, mesurant les effets de lassitude des consommateurs. Le point clé que nous voulons soulever est celui de la « redemande »³⁰. Cela consiste à vérifier si oui ou non les attentes exprimées à un instant donné par les consommateurs conservent une certaine stabilité dans le temps.

Dans notre expérience, la réaction spontanée et l'achat impulsif des consommateurs concernent en effet ce genre de vin qui stylise les conséquences du réchauffement climatique, sans pour autant que cette demande soit véritablement confirmée dans le temps. Nous montrons en fait que des effets de « lassitude » peuvent apparaître après un effet flatteur, et comment cela se traduit en termes de décroissance de volonté d'achat et — pour résumer — de dévalorisation des produits que l'on croyait au départ extrêmement bien valorisables sur un marché. Quand ce marché est susceptible de concerner des achats répétés, cette constatation devient alors cruciale et peut avoir des conséquences économiques insoupçonnées, mais néanmoins visibles si l'on observe l'évolution des ventes.

Une étude expérimentale pour mesurer les préférences des consommateurs

Revenons à la question cruciale. Quelles sont les caractéristiques des vins qui seront plébiscitées demain par les consommateurs ? Il est difficile de donner aujourd'hui des éléments de réponse, compte tenu de l'évolution des goûts, des usages et des modes de consommation, pour ce produit qui n'est pas de première nécessité. Bien sûr, les enjeux environnementaux et l'engouement pour la naturalité ont peu à peu produit leurs effets, comme pour l'ensemble des produits alimentaires (Pèrès *et al.*, 2020; Raineau *et al.*, 2023). Mais ces attentes sociétales n'annihilent pas, loin de là, la question organoleptique. De plus, les habitudes de consommation, qui ne sont pas strictement du même ordre que les goûts, sont sujettes à de grandes différences à travers le monde, de telle sorte qu'il ne serait pas raisonnable d'afficher une position générique. Ces précautions étant prises, il est néanmoins possible de recueillir des résultats à partir de procédures expérimentales qui peuvent facilement être reproduites sur plusieurs zones géographiques, en vue de comparaisons, et au final de proposer peu à peu une cartographie des préférences/choix des consommateurs, en fonction des origines socioculturelles et des habitudes de consommation.

Un dispositif qui associe analyse sensorielle et enchère expérimentale

Le dispositif que nous avons proposé en Nouvelle-Aquitaine a été publié de façons complémentaires par Fuentes Espinoza (2016) et Tempère *et al.* (2019). Pour réaliser ce travail de recherche, nous avons utilisé une méthodologie qui s'appuie, d'une part, sur une analyse sensorielle afin de recueillir l'appréciation des experts et des consommateurs pour des vins différenciés, en fonction des caractéristiques décrites plus haut, et d'autre part, sur une procédure d'enchère expérimentale qui, à l'instar de Lusk et Shogren (2007),

30. C'est l'occasion de rendre hommage à Jacques Puisais, à qui nous avons emprunté cette expression pour lui donner un sens économique. L'enjeu du réachat n'est en effet que trop rarement envisagé dans les enquêtes de consommation, alors qu'il constitue le fondement même de la bonne santé économique d'un produit ou d'une marque.

permet de mieux comprendre les intentions d'achat des consommateurs. Il s'agissait ainsi de crédibiliser le prix maximum d'achat pour un vin, c'est-à-dire le prix de vente au-delà duquel un consommateur refuse d'acheter à un instant donné. Ce prix maximum d'achat, communément appelé « consentement à payer » (CAP), correspond donc à une valorisation propre à chaque consommateur, contrairement au prix de marché qui s'impose à tous de façon identique. Bien entendu, le CAP des consommateurs dépend des caractéristiques sociodémographiques et des revenus disponibles, mais aussi des envies d'achat du moment et de la capacité matérielle d'acquisition du produit. Néanmoins, la comparaison instantanée des CAP « révélés » pour différents vins, avec différents profils organoleptiques, et le cas échéant différentes informations disponibles sur ces vins, permet de mesurer les attentes réelles sur les marchés. Nous nous sommes quant à nous focalisés essentiellement sur l'effet des caractéristiques sensorielles.

La sélection des vins (évaluation en laboratoire par un groupe d'experts)

Trois vins rouges (A, B, et C) provenant d'une même AOC de la région de Bordeaux ont été sélectionnés, tous issus du même millésime 2010 — un millésime chaud, choisi pour la qualité générale de l'ensemble des vins des appellations bordelaises. Bien que faisant partie de la même AOC (et donc d'un territoire bien délimité au sein du Bordelais), ces vins présentaient de fait des caractéristiques très différenciées, en lien avec celles que nous avons exposées concernant les conséquences du réchauffement climatique. Tout d'abord, les vins présentaient des teneurs en éthanol allant de 13,9% vol. (vin A de notre expérience) à 15,2% (vin B de notre expérience). Un vin C intermédiaire avait un niveau d'éthanol de 14,4%. Comme le montre la figure II-2-1, le vin A présentait de plus l'intensité fruit cuit/confituré la plus faible, le vin B, à l'opposé, l'intensité la plus forte, alors que le vin C avait un niveau d'intensité intermédiaire. Enfin, un vin « pirate » A' a été confectionné à partir du vin A, par un ajout « externe » d'éthanol, afin de retrouver le niveau exact de pourcentage d'éthanol du vin B, l'objectif étant de contrôler si nos résultats pouvaient être expliqués uniquement par cette caractéristique du degré d'alcool.

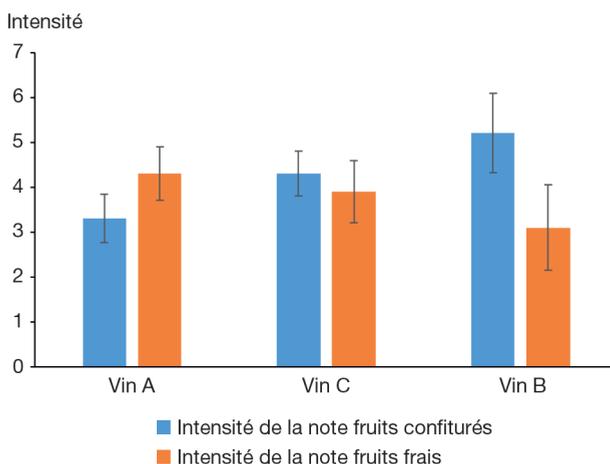


Figure II-2-1. Intensité moyenne des notes fruits frais et fruits confiturés obtenues pour les vins rouges sélectionnés. Source : Tempère et al., 2019.

Le recrutement des consommateurs

Près de 200 consommateurs girondins ont été sollicités, sur la base de la consommation et de l'achat régulier de vins de Bordeaux au-delà de 15 € la bouteille de 75 cL. Nous avons réparti ces consommateurs en deux groupes, G1 et G2, ayant sensiblement les mêmes caractéristiques moyennes sur les critères de l'âge, du sexe et des catégories socioprofessionnelles, ainsi que des habitudes et fréquences de consommation. Ces deux groupes ont été soumis au même protocole expérimental en laboratoire. Néanmoins, le groupe G2 était beaucoup plus familiarisé avec les vins extrêmes A et B. Il avait en effet eu l'occasion de les consommer sur une période de trois jours précédant l'expérience. Chaque jour, les consommateurs de ce groupe devaient tester les deux vins qui leur avaient été fournis préalablement, et inscrire une appréciation de chacun des deux vins, avec la seule mention de référence A ou B en guise d'étiquetage. À aucun moment, les consommateurs du groupe G2 n'ont été avertis que les vins A et B étaient également présents le jour même de l'expérience en laboratoire. Simplement, contrairement au groupe G1, ils avaient eu un temps préalable important pour se faire une opinion plus élaborée sur les vins extrêmes qui constituaient le cœur de notre comparaison expérimentale.

Le protocole expérimental

Nous avons donc recruté un nombre important de consommateurs, de telle sorte qu'ils représentaient une population suffisamment diversifiée sur le plan des caractéristiques sociodémographiques. Durant le marché expérimental, ils devaient révéler leurs CAP pour chacun des vins suivant une procédure incitative³¹. À aucun moment de l'expérience, l'identité des vins n'était révélée aux consommateurs, mis à part le millésime et la région d'origine. Bien entendu, le prix de vente effectif des vins n'était pas non plus communiqué.

Au total, 184 consommateurs ont suivi le protocole expérimental, moyennant un dédommagement pour leur participation (recrutement par une entreprise spécialisée). Chaque groupe comptant 92 participants, quatre séances regroupant 22 à 28 consommateurs ont été nécessaires pour chacun des deux groupes G1 et G2. Ces consommateurs fournissaient un CAP pour chaque vin dégusté à l'aveugle et pouvaient réviser ce CAP au fur et à mesure de la découverte visuelle, olfactive, puis gustative.

Plus précisément, le déroulement des étapes informationnelles était le suivant :

- **étape 0 (cadre informationnel)** : apport d'information commune aux quatre vins concernant le nom de l'AOC retenue et le millésime (2010) ;
- **étape 1 (étape visuelle)** : évaluation simultanée de la couleur de chacun des quatre vins ;
- **étape 2 (étape olfactive)** : évaluation simultanée des arômes de chacun des quatre vins ;
- **étape 3 (étape gustative)** : évaluation simultanée du goût de chacun des quatre vins ;
- **étape 4 (étape « information degré d'alcool »)** : information sur le degré d'alcool exact de chacun des quatre vins.

31. La méthode dite « BDM » (initiales de Becker, DeGroot et Marschak, 1964) que nous avons utilisée fournit une révélation directe des CAP des consommateurs pour chacun des vins. Cette méthode permet en outre de s'affranchir des biais purement déclaratifs des enquêtes traditionnelles.

Comme on le voit, le protocole expérimental est en information croissante, sachant que notre démarche consistait à respecter au mieux l'ordre habituel de découverte des caractéristiques intrinsèques des vins, en fonction de nos objectifs expérimentaux. À chaque étape, chaque consommateur déclarait et révisait potentiellement son CAP pour chaque vin, compte tenu de l'information complémentaire donnée à cette étape.

Résultats de l'expérimentation pour les deux groupes de consommateurs

L'objectif de l'expérience étant de se limiter à une mesure de l'évolution des CAP, et non pas à leur niveau absolu à un moment donné, nous avons normalisé à 100 le CAP obtenu à la première étape de l'expérience. Bien entendu, aucune différence ne se fait entre les vins à ce stade, vu que l'information commune est identique. À partir de là, la figure II-2-2 représente l'évolution des CAP moyens pour les quatre vins et pour chaque groupe de consommateurs G1 et G2.

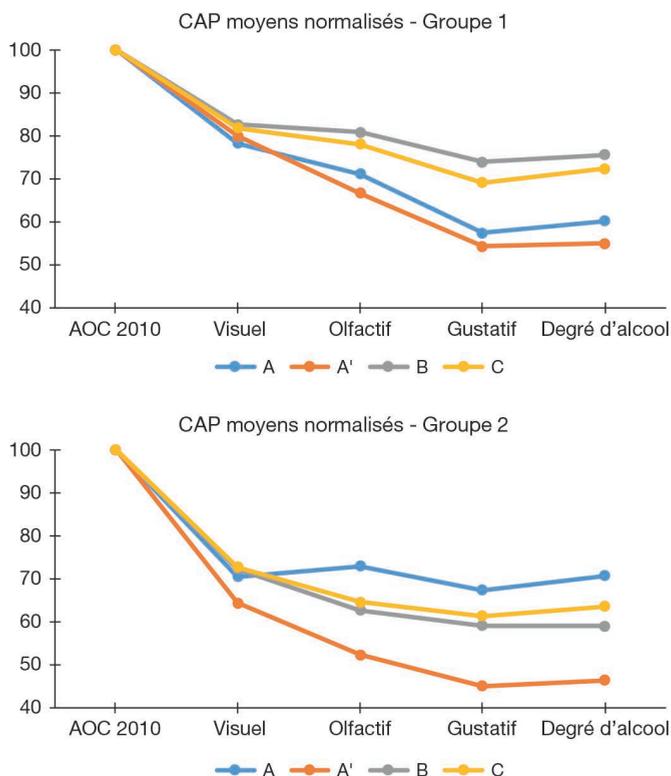


Figure II-2-2. Consentements à payer (CAP) moyens normalisés par vin et par étape pour les groupes G1 et G2 de consommateurs. Source : Tempère et al., 2019.

Pour le groupe G1, le vin B est très nettement préféré au vin A. Les tests non paramétriques de Friedman montrent une préférence du vin B par rapport au vin A avec une significativité de 5%, pour ce qui concerne l'étape 3 gustative et l'étape 4 d'information

sur le degré d'alcool. Le vin C intermédiaire obtient un CAP moyen également intermédiaire entre le vin A et le vin B. À l'inverse, le vin pirate A' obtient le CAP moyen le plus faible. Néanmoins, l'écart avec le vin A n'est pas significatif. On peut donc considérer que le vin pirate reste dans l'espace compétitif, ce qui permet de ne pas invalider son introduction sur le marché.

Nous vérifions cependant comment cette évolution des CAP du groupe G1 peut être largement remise en question par le groupe G2 qui avait suivi au préalable la période de familiarisation avec les vins. Si l'allure générale de l'évolution des CAP est similaire sur la deuxième série de courbes, elle s'accompagne en revanche d'une inversion des CAP, avec le vin A qui devient significativement préféré au vin B, pour les étapes « olfactive » et « information degré d'alcool ». Le vin C obtient là encore un CAP intermédiaire entre le vin A et le vin B, alors que le vin pirate A' est maintenant considéré comme très inférieur et ce, de façon significative, à l'ensemble des autres vins. Ce vin pirate est cette fois « éjecté » du marché, ce qui montre au passage une bonne capacité de discernement des consommateurs quand il s'agit de payer et pas uniquement d'évaluer.

Néanmoins, le point important à soulever est que cette inversion des préférences entre le vin A et le vin B n'est pas liée à une meilleure appréciation du vin A d'un groupe à l'autre. Le CAP pour ce vin A ne varie en effet que de 6% entre les deux groupes et de façon non significative. Il s'agit au contraire d'un désintéret pour le vin B, qui perd plus de 20% de CAP entre le groupe G1 et le groupe G2. Notons que ce désintéret, mesuré ici à la dernière étape du protocole, est en réalité perceptible dès l'étape olfactive de l'expérience.

La question est alors de savoir si ce sont bien les consommateurs qui ont modifié leurs préférences. En prévision de ce risque, nous avons effectué une enquête complémentaire auprès d'eux sur leur perception et leur appréciation réelle des caractéristiques directement influencées par le réchauffement climatique. Il apparaît notamment que si 63% d'entre eux plébiscitaient le vin B, justement pour son caractère de fruits confiturés, seulement 39% répondaient positivement à la même question pour ce qui concerne le groupe G2. Au final, nous retrouvons ici un phénomène de renforcement de la capacité de discrimination des consommateurs après avoir été confrontés à la dégustation de différents vins (Owen et Machamer, 1979), sachant que la reconnaissance des vins peut être acquise grâce à un apprentissage perceptif « incident », ce qui rejoint le phénomène inconscient observé notamment par Hughson et Boakes (2009).

Les enseignements de l'expérimentation

Cette expérience peut rendre compte d'une évaluation par le marché des caractéristiques des vins d'une même AOC influençables par le réchauffement climatique. Notre hypothèse de travail a été de considérer que ces caractéristiques seraient assimilables à celles observées depuis plusieurs années sur certains vins, intentionnellement produits pour répondre à une demande « actuelle » du marché. Dans ce contexte, nous avons montré la fragilité des jugements qui peuvent être faits sur des préférences de court terme, ce qui est bien souvent le cas dans les évaluations habituelles, les dégustations professionnelles ou les enquêtes d'opinion diffusées dans les médias, qui se présentent fréquemment en prescripteurs de qualité.

Un risque de lassitude pour les vins du changement climatique

Notre révélation incitée de la qualité perçue par la voie des CAP montre des effets de lassitude qui conditionnent les achats répétés. Ainsi, le risque et l'impact économique que représente le réchauffement climatique au niveau de la consommation tiendraient en grande partie à une désaffection progressive des marchés pour un style de vin qui ne fait plus recette. Il serait d'ailleurs utile de faire un parallèle avec d'autres marchés où l'on voit par exemple un large développement des gammes de boissons à teneur réduite en alcool et non alcoolisées. La substitution du vin par la bière, le développement des boissons à base de thé, des vins sans alcool, etc., sont autant de signaux qui devraient nous conduire à nous interroger un peu plus sur un désamour d'un certain nombre de consommateurs de vins (voir récemment Čiderová et Ščasný, 2022). On peut effectivement envisager que l'une des raisons de la forte décroissance du marché du vin rouge dans certains pays soit en partie liée à ces concentrations trop fortes, un manque de fraîcheur, et aux taux d'alcool devenus trop élevés et insupportables pour nombre de consommateurs. Du reste, en règle générale, en France, les vins rosés et les vins blancs sont plutôt moins victimes de la crise économique actuelle du secteur sur le marché national que les vins rouges (FranceAgriMer, 2022).

L'influence des consommations d'autres boissons

Il est également intéressant de remarquer que les notes hédoniques obtenues à l'étape gustative ont été comparées aux fréquences de consommation d'autres boissons (jus de fruits, boissons non alcoolisées, vins aromatisés, vins fortifiés et spiritueux). Le seul effet significatif observé est celui de la fréquence de consommation de sodas sur les évaluations du vin B de notre expérience, aux arômes de fruits confiturés. Les sujets qui déclarent consommer ces sodas une fois par semaine ou plus ont en effet davantage apprécié le vin B (il est certain à 95% que la note d'appréciation du vin B pour ce groupe est comprise entre 5,1 et 6,7 sur 10) que ceux qui en consomment moins souvent (pour ceux-là il est certain à 95% que la note d'appréciation du vin B est comprise entre 4,3 et 5,3 sur 10). De plus, les consommateurs les plus habitués aux sodas préféreraient nettement, et significativement, le vin B au vin A (il est certain à 95% pour ce groupe que la note d'appréciation du vin A est comprise entre 3,7 et 5,5 sur 10).

Évaluer les préférences des consommateurs au regard des innovations pour l'adaptation

La question qu'il nous faut poser par ailleurs est celle de la confiance dans les innovations qui faciliteront l'adaptation à l'évolution des goûts des consommateurs. Sur le plan agronomique, les possibilités sont réelles et à ce jour insuffisamment exploitées. Il est important de garder à l'esprit que tous les développements agronomiques jusqu'à la fin du xx^e siècle ont été dédiés à l'amélioration de la maturité du fruit (gestion du feuillage, orientation des rangs, vendange en vert, etc.). Aussi, il paraît aisé de défaire ce que nous avons patiemment construit, de réorienter nos savoirs dans un contexte climatique à l'opposé de ce que la génération précédente a connu. Par ailleurs, on peut légitimement se demander si cette option « durable » ne serait pas plus cohérente que des solutions plus techniques, mais moins en phase avec une production de qualité et des exigences actuelles en matière de responsabilité sociétale des entreprises (RSE).

Par exemple, une gestion plus précise du couvert végétal, des travaux en vert et de façon générale du niveau de maturité des raisins peut contribuer à moduler cette évolution préjudiciable à l'appréciation durable des vins rouges produits à Bordeaux (cf. chapitre I-7).

Sur le plan œnologique, le choix des levures peut être un levier d'action, mené conjointement aux techniques plus courantes et invasives d'acidification voire de désalcoolisation (cf. chapitre I-8). Bien que le travail à la vigne soit vertueux et plus en lien avec la valorisation du terroir, force est de constater qu'au niveau mondial ces techniques œnologiques sont de plus en plus courantes pour compenser les effets du changement climatique, dans des régions où le climat est déjà contraignant. À ce titre, nous avons étudié dans un autre projet (Fuentes Espinoza, 2016) l'innovation « réduction partielle de la teneur en alcool » sur des vins rouges, et l'innovation « acidification » sur des vins rosés. Pour ces derniers, nous avons testé deux vins : un vin témoin D et un vin E acidifié, dont le pH était donc plus faible. Le vin E était issu du vin D après le processus d'acidification. Pour les vins rouges, nous avons testé trois vins : un vin témoin F d'une teneur en alcool mesurée à 14 % vol., un vin G à 12 % vol. et un vin H à 10 % vol. Les vins G et H étaient issus du vin F après, respectivement, réduction partielle d'alcool de 2 et 4 % vol.

Tableau II-2-1. Caractéristiques d'acidité et de pourcentage d'alcool des vins proposés.

Source : Fuentes Espinoza, 2016.

pH		Degré d'alcool		
Vins rosés		Vins rouges		
Vin D (témoin)	Vin E (acidifié)	Vin F (témoin)	Vin G (désalcoolisé)	Vin H (désalcoolisé)
3,57	3,41	14 % vol.	12 % vol.	10 % vol.

Si, de manière générale, les vins témoins (sans innovation) sont préférés, en CAP et en perception organoleptique (notes hédoniques), aux vins issus des deux innovations testées, ces différences ne sont pas significatives et ces résultats pourraient être perçus comme révélateurs d'une certaine absence de préférences. Une première interprétation serait alors une incapacité des consommateurs à pouvoir discriminer le vin témoin et le vin traité avec l'innovation, pour les deux caractéristiques alcool et acidité, allant ainsi dans le sens de résultats de nombreux auteurs (Lisanti *et al.*, 2011 ; Escudier *et al.*, 2014). Cependant, une analyse plus fine par rang nous permet de conclure à l'existence de groupes de consommateurs avec des préférences bien déterminées³². Ainsi, les vins testés (témoin et modifié) sont perçus de manière différente dans leur évaluation organoleptique. Ces résultats, obtenus à partir de l'analyse des préférences individuelles et par rang, permettent d'envisager une acceptation possible des innovations testées par une partie seulement des consommateurs.

32. Des analyses de variance, avec une comparaison par paires à l'aide du test de Duncan ($p < 0,05$), confirment ce résultat, avec des différences très significatives entre le premier et le deuxième choix réalisés par les consommateurs.

Conclusion

Nous avons dans ce chapitre abordé la question du changement climatique pour l'adaptation de la viticulture, en mettant l'accent sur l'inadéquation offre-demande sur le marché du vin. La question des caractéristiques des produits qui seront proposés à l'avenir aux consommateurs nous paraît en effet cruciale, car l'évolution des goûts semble diamétralement opposée à celle de l'évolution « naturelle » des caractéristiques des vins. On peut à cet égard se poser la question si ce risque de désaffection des consommateurs n'est pas en réalité déjà engagé. En d'autres termes, nous pensons que la désaffection pour le produit « vin », à laquelle on assiste en France et dans beaucoup de pays méditerranéens depuis plusieurs années, est autant liée à cette inadéquation organoleptique qu'aux aspects sanitaires et environnementaux souvent invoqués par les observateurs de la filière.

Notons au passage que le phénomène de lassitude que nous avons exposé ici est trop peu abordé dans les analyses sensorielles. La « redemande » est pourtant un enjeu économique auquel il faut penser quand on anticipe les caractéristiques idéales des vins de demain, en ne perdant jamais de vue que le terme de « redemande » signifie avant tout acceptation régulière d'un prix de vente, pour peu que celui-ci soit relativement stable. En somme, une affaire de consentement à payer qui se prolongerait dans le temps...

Les innovations œnologiques et agronomiques, ou tout simplement le retour à des systèmes de production mieux orientés, permettront sans doute de corriger les effets pervers du réchauffement climatique sur les caractéristiques de vins. Les solutions plus radicales, comme la délocalisation des vignobles, poseront sans doute d'autres problèmes d'adéquation organoleptique. Il faudra là encore prendre garde que ces innovations soient réellement validées par le marché, en intégrant la condition d'une recherche toujours plus grande de naturalité des consommateurs, même si ce terme, mal défini, doit être pris avec beaucoup de précautions.

Le lecteur remarquera que, tout au long de ce chapitre, nous avons préféré utiliser le terme de « réchauffement climatique » plutôt que celui de « changement climatique ». Nous nous sommes en effet concentrés sur des effets directement liés à l'augmentation des températures, plutôt qu'aux variabilités de production qui pourraient également avoir des conséquences économiques importantes, mais sur un tout autre registre. Les aléas de l'offre provoquent des difficultés d'approvisionnement des marchés, de construction des marques et de leur commercialisation, qu'il conviendrait d'analyser et auquel il faudra également apporter une réponse.

CONSTRUIRE DES « ÉCOSYSTÈMES D'ADAPTATION » POUR ACCOMPAGNER LA VITICULTURE FRANÇAISE

James Boyer et Jean-Marc Touzard

Introduction

L'adaptation à long terme des entreprises viticoles à la crise climatique appelle une révision de leurs systèmes de production, en combinant des innovations variétales et techniques, des changements organisationnels et de nouvelles stratégies spatiales pouvant aller jusqu'à une relocalisation d'une partie du vignoble (Ollat *et al.*, 2016). Mais ces changements ne sont pas le fait d'entreprises isolées ! Ils dépendent de connaissances et de ressources qui sont mobilisées à travers des interactions entre de nombreux acteurs au sein du secteur vitivinicole, des territoires ou régions viticoles, et plus globalement de la société. Étudier l'adaptation dans les vignobles suppose donc de prendre en compte ces interactions, les réseaux et les connaissances qu'elles mobilisent ou construisent, et les institutions qui peuvent les organiser à différentes échelles, du local jusqu'à l'international...

Ces dimensions collectives sont au cœur des recherches en sciences sociales sur l'innovation. Elles sont saisies conjointement à travers la notion de système d'innovation, lequel peut être national, sectoriel ou régional³³, mais aussi à travers celle de *cluster*, plus ciblée sur les entreprises d'un même secteur et géographiquement proches (Porter, 1998). Des travaux mobilisant ces notions ont déjà été conduits dans le secteur viticole, en particulier pour analyser le rôle de l'innovation dans la compétitivité des vignobles du Nouveau Monde (Porter et Bond, 1999; Giuliani *et al.*, 2010). Un enjeu des recherches conduites dans le projet Laccave a été de remobiliser ces approches pour mieux comprendre l'adaptation des vignobles français au changement climatique, et plus particulièrement le rôle de la recherche (Boyer et Touzard, 2016 et 2021). Nous voulons, dans ce chapitre, revenir sur les travaux conduits sur les systèmes d'innovation et les *clusters* dans le secteur de la vigne et du vin, puis présenter la démarche multiéchelle développée dans Laccave pour analyser les dimensions collectives des actions climatiques dans les vignobles. Ces recherches montrent l'importance des relations construites à l'échelle des vignobles régionaux entre les viticulteurs, les interprofessions et les organisations de recherche et de formation, préfigurant le développement d'« écosystèmes d'adaptation au changement climatique ».

33. Un système d'innovation peut être défini comme un ensemble d'acteurs, d'organisations, d'institutions et de réseaux qui favorisent la production de connaissances nouvelles et l'innovation dans un espace donné, géographique ou sectoriel (Touzard *et al.*, 2015).

L'enjeu climatique dans l'analyse des systèmes d'innovation de la vigne et du vin

Notre analyse des dimensions collectives et institutionnelles de l'adaptation au changement climatique dans les vignobles français prolonge des recherches plus anciennes qui ont montré le rôle des systèmes d'innovation dans la compétitivité des vignobles du Nouveau Monde. Nous proposons de renouveler ce cadre d'analyse à travers la notion d'écosystème d'adaptation.

Systèmes régionaux d'innovation et *clusters*, nouvelles conditions de la compétitivité des vignobles ?

En France, les travaux sur l'innovation dans le secteur de la vigne et du vin ont longtemps privilégié deux entrées : d'une part, des approches à l'échelle nationale montrant l'importance d'une régulation sectorielle, de politiques et d'institutions qui codifient les qualités du vin, cadrent l'innovation et orientent les recherches sur la vigne et le vin (Boulet et Bartoli, 1988 ; Sébillotte *et al.*, 2003 ; Hannin *et al.*, 2010) ; d'autre part, des études à l'échelle locale sur l'adoption d'innovations par les viticulteurs, en prenant en compte leurs réseaux professionnels et le rôle d'organisations comme les syndicats d'appellation ou les caves coopératives (Campagnone, 2004 ; Chiffolleau et Touzard, 2014).

Mais la forte croissance des vignobles du Nouveau Monde à partir du milieu des années 1980 a suscité de nouvelles questions et approches, rejoignant les travaux qui se développaient dans d'autres secteurs sur les dynamiques territoriales de l'innovation, les systèmes régionaux d'innovation ou les *clusters* (Etzkowitz et Leydesdorff, 2000). Le développement rapide de ces « nouveaux vignobles » n'était en effet pas seulement lié à des coûts de production plus faibles ou à des investissements étrangers, mais aussi à des innovations, favorisées par des relations de coopération au sein d'une même région entre les entreprises viticoles, des organisations professionnelles et des universités ou centres de recherche (Giuliani et Bell, 2005). Les universités de Davis en Californie, de Stellenbosch en Afrique du Sud ou d'Adélaïde en Australie ont ainsi joué un rôle clé au centre de « *clusters* viticoles » (Porter et Bond, 1999), dans lesquels se forment de nouveaux ingénieurs, techniciens et commerciaux, se construisent des connaissances adaptées aux conditions locales de production, s'élabore une culture entrepreneuriale et innovante du vin, et peuvent s'établir des liens internationaux avec d'autres centres de recherche et formation, en particulier Bordeaux, Montpellier ou Dijon (Touzard et Hannin, 2023). Dans une économie viticole mondialisée, la compétitivité se jouerait donc à long terme dans des territoires qui s'organisent, favorisent l'innovation et la formation, et associent des réseaux de coopération à l'échelle locale et internationale.

En écho à ces travaux sur les *clusters* du Nouveau Monde viticole, des recherches se sont développées en France, notamment dans le cadre du projet Laccave, pour caractériser les systèmes régionaux d'innovation de la vigne et du vin, analyser leurs effets sur la compétitivité des vignobles français, et la manière dont ils peuvent intégrer les nouveaux enjeux climatiques et accompagner les viticulteurs dans leurs actions d'adaptation (Boyer et Touzard, 2016).

Intégrer l'enjeu climatique à travers l'analyse d'écosystèmes d'innovation

Les travaux sur les *clusters* viticoles, dans les « anciens » comme dans les « nouveaux » pays viticoles, ont en effet pris en compte progressivement d'autres enjeux que la croissance économique et le renforcement de positions dans les marchés. Ils questionnent aujourd'hui les conditions organisationnelles, relationnelles et cognitives qui permettent l'adaptation à des enjeux comme la préservation de l'environnement ou le changement climatique, notamment en Californie (Levy et Lubell, 2018), en Australie (Ratten, 2018) ou en Italie (Chaminade et Randelli, 2020). En France, les travaux conduits à travers le projet Laccave sont allés dans ce sens en montrant que l'enjeu climatique amène à inscrire les innovations dans une révision stratégique à l'échelle des régions ou *clusters* viticoles (Ollat *et al.*, 2022 ; Touzard et Hannin, 2023). Il s'agit de prendre en compte :

- l'évolution des écosystèmes, des sols et du climat qui ne peuvent plus être considérés comme des facteurs immuables de la qualité des vins ;
- l'ouverture de la gouvernance des vignobles à d'autres acteurs du territoire, impliqués dans la gestion des ressources locales ;
- l'expérimentation d'innovations dans des domaines plus nombreux et qui interagissent (matériel végétal, pratiques agronomiques et œnologiques, gestion des écosystèmes et des risques, certification et communication...);
- la combinaison de ces leviers d'action dans des stratégies adaptatives, anticipant différents chemins et bifurcations possibles...

Ces nouvelles orientations stratégiques, qui s'affirment à l'échelle des régions viticoles, rejoignent l'évolution des recherches qui continuent à étudier les dynamiques territoriales de l'innovation en économie ou sciences de gestion. Ces travaux substituent à la notion de *cluster*, qui reste centrée sur les collaborations locales entre entreprises d'un même secteur, celle « d'écosystème d'innovation local » (Torre et Zimmermann, 2015 ; Suominen *et al.*, 2019), qui vise à mieux saisir de nouvelles conditions de l'innovation, mettant en jeu :

- des collaborations avec des entreprises géographiquement proches, mais appartenant à différents secteurs, par exemple pour l'accès à des services ou des formations communes, l'appui au *management* ou à l'innovation ;
- la coconstruction de projets et valeurs communes à l'échelle d'un territoire, y compris pour sa promotion, pour favoriser son attractivité ;
- des interactions plus ouvertes avec la société civile ;
- la prise en compte des relations métaboliques avec le milieu local et ses ressources naturelles, dont il convient d'assurer la durabilité.

Un écosystème d'innovation constitue donc un lieu privilégié d'échange de connaissances tacites, empiriques et scientifiques entre les entreprises, les acteurs locaux et les universités ou organismes de recherche. Il forme un environnement favorable à la gestion de nouvelles connaissances au sein des territoires (Boyer *et al.*, 2021).

Des travaux dans les régions viticoles ont commencé à mobiliser le cadre d'analyse des écosystèmes d'innovation (Levy et Bell, 2018 ; Marquès *et al.*, 2021) ou même à le prolonger en proposant la notion « d'écosystème d'adaptation au changement climatique » (Boyer et Touzard, 2021). Comment peuvent se construire, de manière plus ouverte et participative, des réseaux, des organisations et des connaissances opérationnelles

sur le changement climatique, sur ses impacts et les solutions pour y faire face ? Quels facteurs peuvent favoriser dans les régions viticoles des relations de coopération entre acteurs économiques, politiques, scientifiques ou de la société civile pour développer de tels écosystèmes d'adaptation ? Les travaux réalisés dans la cadre du projet Laccave, en particulier à travers la thèse de James Boyer (2016a), ont permis d'avancer sur ces questions en croisant plusieurs angles d'analyse dans trois régions viticoles.

Une méthode mixte pour étudier les systèmes d'innovation régionaux des vignobles français

Pour étudier le rôle des systèmes d'innovation dans l'adaptation des vignobles français, nous avons retenu trois régions viticoles contrastées, dans lesquelles ont été conduites successivement trois approches complémentaires, aux échelles des institutions, des viticulteurs et des chercheurs de ces régions.

Le choix de trois régions viticoles et de cinq domaines d'adaptation

Trois régions viticoles ont été retenues en tenant compte de l'importance de la production de vin en valeur, de la présence d'activités de recherche et développement (R et D) sur la vigne et le vin, et de leur appartenance à des aires climatiques contrastées : l'Aquitaine pour la zone climatique océanique, le Languedoc-Roussillon pour la zone méditerranéenne, la Champagne pour une aire de climat plus continental. Le changement climatique, observé et attendu dans ces trois régions, présente des effets en partie distincts (Ollat et al., 2022). Le vignoble du Languedoc-Roussillon est déjà marqué par des stress hydriques prononcés, des concentrations élevées d'alcool et des baisses d'acidité dans les vins ; l'Aquitaine a plutôt bénéficié de la hausse des températures, mais des effets préoccupants apparaissent sur la pression des maladies et les caractéristiques des vins issus des cépages actuels (Merlot notamment) ; la Champagne, sans doute plus épargnée à court terme, pourrait être aussi soumise à des canicules estivales, avec une pression plus forte des maladies.

Par ailleurs, cinq domaines ont été définis pour l'adaptation au changement climatique, correspondant à la fois à des domaines d'action ou d'innovation pour les viticulteurs, et à des domaines de recherche ou d'expérimentation pour les chercheurs : le matériel végétal, le mode de conduite du vignoble (architecture des vignes, itinéraires techniques, gestion du sol et de la contrainte hydrique...), la lutte contre la pression parasitaire, les pratiques œnologiques pouvant corriger des effets du changement climatique, les stratégies spatiales et économiques au sein d'un même terroir ou sur des espaces plus éloignés.

Caractérisation de la compétitivité et des institutions des régions viticoles

Le premier angle d'analyse se situe à l'échelle de chaque région administrative en caractérisant à la fois la compétitivité économique de son vignoble et les institutions qui peuvent jouer sur l'innovation et l'adaptation au changement climatique. La compétitivité de chaque vignoble régional a été étudiée sur la période 2000-2014 à partir des indicateurs de leur part dans la production en valeur des vins français, de leur productivité

moyenne en valeur par hectare, et de la valeur moyenne du vin par hectolitre³⁴. Les institutions associées aux vignobles régionaux ont été décrites globalement selon leurs activités de recherche, d'enseignement, de conseil, d'expérimentation ou de financement, selon les moyens (salariés en équivalent temps plein, budget) dédiés à la R et D sur la vigne ou le vin, et selon une étude bibliométrique sur les publications vigne et vin (2008-2014) des chercheurs ou ingénieurs à partir des bases WOS³⁵ (Boyer et Touzard, 2016).

Enquêtes auprès des viticulteurs

Le deuxième angle d'analyse se situe à l'échelle des viticulteurs de chaque région et de leurs actions pour s'adapter au changement climatique. Cette étude, déjà présentée dans le chapitre II-1, s'est appuyée sur des enquêtes auprès de 87 viticulteurs qui vinifient leur raisin pour la commercialisation de vins en appellation : 28 en Champagne, 29 en Bordeaux et 30 en Languedoc. L'échantillon a été raisonné selon les critères de taille économique relative (deux catégories d'entreprises dans chaque région) et de production conventionnelle ou bio du raisin, tout en s'assurant d'une distribution spatiale au sein de chaque région. Le questionnaire couvre les caractéristiques générales du producteur et de son entreprise, ses perceptions du changement climatique et de ses effets, les actions engagées dans chacun des domaines d'adaptation, et les demandes de conseil réalisées ou envisagées par domaine. Il s'agit de pouvoir représenter les réseaux égo-centrés de conseil de chaque viticulteur avec six catégories d'acteurs, appartenant aux institutions de R et D caractérisées par l'étude précédente (Boyer et Touzard, 2021).

Enquêtes auprès des acteurs de la R et D vitivinicole

Le troisième angle d'analyse concerne directement les actions des personnes travaillant dans les organisations de recherche et d'expérimentation pour la vigne et le vin (INRAE, CNRS, universités, IFV, chambres d'Agriculture, interprofessions viticoles...). Cette troisième étude a été réalisée en 2015 à partir de 94 entretiens : 41 en Languedoc-Roussillon, 34 à Bordeaux et 19 en Champagne. L'échantillon a été constitué à partir des listes des chercheurs et d'ingénieurs travaillant sur la vigne et le vin, et en s'assurant d'une répartition entre « chercheurs » (62) et « ingénieurs » (32). Le questionnaire prend en compte des informations sur la carrière et l'activité de chaque acteur, l'importance du changement climatique dans ses travaux, ses productions et projets sur chaque domaine de l'adaptation, et les modalités de diffusion de ses informations vers les viticulteurs (liens personnels, projets communs, conférences, publications dans des revues techniques, etc.) (Boyer 2016b).

Analyser et confronter les données des trois études

Les trois études ont fait l'objet d'une méthode mixte (Labarthe et Schnebellin, 2023), combinant analyse qualitative des arguments fournis par les enquêtés et analyses statistiques visant à tester l'influence de différents facteurs (structurels, relationnels, trajectoires

34. Données issues des comptes départementaux de l'Agriculture et de FranceAgriMer.

35. Web of Science (WOS), géré par l'Institute for Scientific Information, qui recense plus de 10000 revues. Les mots-clés utilisés associaient les domaines d'adaptation au changement climatique, et les institutions et localisation des auteurs.

personnelles...) sur l'engagement d'action d'adaptation à l'échelle du vignoble (pour les viticulteurs) ou de production de connaissance dans la R et D (pour les chercheurs et ingénieurs). Le choix des variables à expliquer (perception du changement climatique, actions engagées), des variables explicatives et des modèles économétriques (régression multiple ou fonction logistique) qui les combinent ont été présentés dans des articles plus techniques (Boyer 2016b ; Boyer et Touzard, 2021).

Les résultats des trois études sur les systèmes régionaux d'innovation et l'adaptation des vignobles

Nous présentons ici les résultats des trois études conduites sur les systèmes d'innovation des régions viticoles retenues, en mettant en avant les conditions institutionnelles et organisationnelles qui jouent sur leur compétitivité et leur adaptation au changement climatique. Ces résultats seront ensuite croisés et discutés dans la conclusion du chapitre.

La compétitivité des vignobles dépend de l'intensité de R et D et de l'implication de l'interprofession

La première étude a montré que l'évolution de la compétitivité des vignobles régionaux entre 2000 et 2016 était contrastée et liée aux caractéristiques de leurs institutions de R et D. Le Languedoc-Roussillon, qui se distingue par l'importance de sa surface et de son volume de production, mais aussi la plus faible valorisation du vin (autour de 150 €/hL en 2016), a d'abord connu une baisse de sa part dans la valeur de la production française de vin, puis une croissance à partir de 2007, atteignant 15% en 2016. À l'inverse, la Champagne bénéficie de la plus forte valorisation par hectolitre (1 100 €/hL) sur une surface plus modeste (31 000 ha), constituant de loin le premier vignoble français en valeur (plus de 3 milliards d'euros à la production). La part de la Champagne dans la valeur de la production française de vin a fortement augmenté entre 2000 et 2007 (de 22 à près de 30%), pour se maintenir ensuite. Il s'agit du vignoble le plus compétitif selon nos critères. Le vignoble bordelais, deuxième en France pour sa surface, son volume et sa valeur, offre une valorisation intermédiaire (400 €/hl), avec une diminution forte de sa part de production jusqu'en 2008 (de 20 à 15%), pour revenir ensuite autour de 18%.

L'analyse des institutions pouvant jouer sur l'innovation dans les vignobles montre une même organisation générale, avec la présence dans toutes les régions de centres de recherche publique (INRAE ou CNRS) et d'enseignement dédiés à ce secteur (université, école d'ingénieur ou de commerce, lycée agricole), d'organisations d'expérimentation et de conseil (pôles de l'IFV, chambres d'Agriculture...), d'interprofessions viticoles et ODG, de services de l'État (directions régionales de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt [Draaf], direction départementale des territoires [DDT], FranceAgriMer), de collectivités locales intervenant sur la vigne et le vin, ou encore d'institutions médiatiques liées au vin (presse spécialisée, salon, événements). Toutefois, cette infrastructure institutionnelle diffère d'une région à l'autre par le poids absolu ou relatif des organisations et leur agencement. Le Languedoc-Roussillon et l'Aquitaine concentrent ainsi

en France les activités de R et D et de formation sur la vigne et le vin, avec plus de deux tiers des budgets et des salariés dédiés en équivalent temps plein et près de 60% des publications. Pourtant, ces deux régions sont moins compétitives que le vignoble champenois ! L'importance des institutions d'un *cluster* viticole régional ne serait-elle donc pas en France déterminante pour sa compétitivité ? Deux éléments viennent en fait infirmer et préciser cette première assertion :

- tout d'abord, il faut prendre en compte l'intensité de R et D, qui divise les indicateurs des organisations régionales (ETP, budget, publications...) par la surface ou le volume de chaque vignoble. La Champagne se retrouve alors bien en première place, avec par exemple en 2015 plus de quatre ETP de R et D pour 1000ha de vigne, contre 2,2 pour l'Aquitaine et seulement 1,4 pour le Languedoc (Boyer et Touzard, 2016);
- par ailleurs, l'implication des interprofessions dans la recherche et l'innovation apparaît comme un facteur clé. En Champagne, le Comité Champagne (CIVC) consacre en 2014 plus de 150 € par hectare en financement de R et D, contre 12 € pour celui du vin de Bordeaux (CIVB)... et seulement 2 € pour l'ensemble des interprofessions du Languedoc-Roussillon.

L'engagement des viticulteurs dans l'adaptation dépend de leurs relations au système régional d'innovation

Les enquêtes auprès des viticulteurs des trois régions ont montré que les perceptions du changement climatique étaient partagées (cf. chapitre II-1) et qu'une majorité d'entre eux avaient déjà engagé en 2015 des actions pour faire face à cet enjeu : 67% en Languedoc, 57% en Champagne et 52% dans le Bordelais. Pour s'adapter, les viticulteurs mobilisent ou envisagent de mobiliser les réseaux qu'ils entretiennent avec les acteurs du système d'innovation régional. Ces relations de conseil diffèrent d'une région à l'autre : en Languedoc, les viticulteurs privilégient les échanges de conseils avec leurs collègues ou les chambres d'Agriculture ; dans le Bordelais, ils se distinguent par des demandes de conseil plus nombreuses vers les fournisseurs et les centres de recherche (Institut des sciences de la vigne et du vin, ISVV) ; en Champagne, ils déclarent vouloir s'adresser principalement à leur interprofession (CIVC). Pour autant, au-delà de ces différences régionales, les tests économétriques montrent des points communs aux trois régions (Boyer et Touzard, 2021) :

- les caractéristiques économiques des entreprises viticoles n'influencent ni la perception du changement climatique ni les actions d'adaptation mises en œuvre ;
- les viticulteurs qui ont l'habitude de demander des conseils aux chambres d'Agriculture, de prendre des stagiaires, de participer à des événements professionnels sont plus enclins à innover pour s'adapter que les autres ;
- le niveau de formation des viticulteurs et leur expérience dans l'activité vitivinicole influencent positivement leur perception du changement climatique et leur probabilité à innover pour s'adapter ;
- les viticulteurs qui sont en bio ou biodynamie se déclarent plus concernés par le changement climatique et plus enclins à innover pour s'adapter.

Les enquêtes auprès des viticulteurs montrent donc que l'engagement d'actions pour l'adaptation au changement climatique est bien lié aux relations qu'ils entretiennent avec les organisations de leur système d'innovation régional (recherche, conseil,

formation) et que cet engagement est plus marqué lorsqu'ils ont déjà développé des stratégies environnementales fortes, rejoignant les conclusions de travaux menés en Californie (Levy et Lubell, 2018).

Les acteurs de la recherche et du développement contribuent différemment à l'adaptation des vignobles

Les enquêtes auprès des acteurs des organisations de recherche, de formation et de développement offrent des informations originales sur leur implication dans l'adaptation des entreprises viticoles de chaque région. Des différences régionales sont repérées, d'une part sur l'importance de la thématique globale du changement climatique, plus forte chez les acteurs du Languedoc-Roussillon et du Bordelais que chez ceux de Champagne, d'autre part sur les domaines de l'adaptation qu'ils prennent en compte, avec par exemple des travaux plus nombreux sur la gestion de l'eau en Languedoc ou sur l'œnologie à Bordeaux. Pour autant, là aussi des points communs aux trois régions peuvent être repérés :

- le niveau d'excellence académique (publications, diplôme) ou les caractéristiques personnelles (âge, sexe...) des acteurs de la R et D ne jouent pas de manière significative sur leur implication dans la production de connaissances sur le changement climatique ;
- par contre, le domaine de recherche ou d'intervention est un facteur important. Les acteurs de la R et D qui travaillent sur le matériel végétal ou sur la conduite du vignoble déclarent s'investir plus dans la production de connaissances sur le changement climatique que ceux qui travaillent sur la lutte contre les maladies, l'œnologie ou les stratégies spatiales et économiques ;
- les acteurs directement liés à la recherche (INRAE, universités et, dans une moindre mesure, IFV) intègrent en moyenne plus l'enjeu du changement climatique dans leurs travaux que les ingénieurs impliqués dans les organisations de conseil, de formation ou d'expérimentation ;
- à l'inverse, ces derniers avaient des relations plus fréquentes avec les viticulteurs, suggérant une forme de dualisme. D'un côté, les chercheurs sont plus concernés par le changement climatique, mais ont moins de contacts avec les viticulteurs ; d'un autre côté, les ingénieurs et conseillers (chambre d'Agriculture, interprofession, œnologues...) ont dans chaque région plus de contacts avec les viticulteurs, mais prenaient moins en compte, en 2015, l'enjeu du changement climatique...

Les enquêtes auprès des acteurs du système d'innovation de chaque vignoble ont donc montré dans les trois régions un décalage entre les chercheurs porteurs de l'enjeu climatique et les acteurs des organisations de conseil et de développement, pour qui cet enjeu est moins présent dans leurs actions... Pourtant, l'enjeu climatique préoccupait déjà largement les viticulteurs, dont une majorité déclarait engager des actions pour y faire face (cf. chapitre II-1). Dans les trois régions, on pouvait donc suggérer l'existence, en 2015, d'un *knowledge gap* (lacune de connaissance) au sein du système d'innovation, du fait qu'une partie des acteurs intermédiaires n'avaient pas encore intégré l'enjeu climatique. Ces résultats confortaient l'importance de développer des projets de recherche interdisciplinaires et participatifs, pour favoriser des interactions plus directes dans chaque région entre viticulteurs et chercheurs autour de l'enjeu climatique.

Conclusion

Les études conduites entre 2014 et 2016 sur les vignobles du Languedoc, de Champagne et du Bordelais ont donc montré que :

- la compétitivité des vignobles régionaux était bien liée à l'intensité de leurs activités de R et D et à l'implication des interprofessions régionales ;
- les viticulteurs étaient majoritairement concernés par l'enjeu climatique et engageaient des actions pour y faire face, et avant tout ceux qui nouaient des relations fortes avec le système d'innovation régional et avaient des pratiques agroécologiques ;
- les acteurs de ce système d'innovation étaient pour autant différemment engagés dans la production de connaissance pour l'adaptation au changement climatique, avec des chercheurs plus impliqués que les acteurs intermédiaires des organisations viticoles.

Ces résultats ont conforté à partir de 2016 une nouvelle orientation du projet Laccave, avec des recherches impliquant davantage les organisations viticoles de chaque vignoble régional et favorisant directement les interactions entre chercheurs et viticulteurs (Ollat *et al.*, 2016). C'est ce qui a motivé notamment l'organisation d'ateliers de prospective dans sept régions viticoles (chapitre II-7), mais aussi d'initiatives prises par les chercheurs à l'échelle locale (chapitres II-5 et II-6), et de plus en plus par des acteurs des chambres d'Agriculture, des interprofessions viticoles, de l'IFV ou de syndicats d'appellation et caves coopératives (encadré II-3-1). Les observations réalisées depuis 2016 sur l'évolution des projets et relations au sein des *clusters* viticoles français suggèrent que l'enjeu du changement climatique est devenu central, associé à celui de l'environnement, construisant des « écosystèmes locaux d'adaptation au changement climatique » (Boyer et Touzard, 2021 ; Touzard et Hannin, 2023). Cette évolution, encore incertaine, peut reposer sur plusieurs conditions :

- l'effet positif de l'intensité de R et D sur la compétitivité des vignobles, montré pour la période 2000-2014, reste *a priori* valable pour les innovations qui contribuent à l'adaptation au changement climatique... sous réserve d'une meilleure intégration de cet enjeu dans l'ensemble des organisations de R et D, ce qui semble aujourd'hui le cas ;
- le rôle que peut jouer une interprofession viticole régionale dans l'adoption d'innovations (à l'image du CIVC en Champagne ou d'InterLoire pour le Val de Loire, cf. encadré II-3-1) peut être retenu comme condition favorable à l'adaptation des vignobles. Cette organisation, contrôlée par les entreprises vitivinicoles, est dans une position clé pour définir les besoins de recherche, les cofinancer et construire des collaborations et réseaux de connaissance ;
- pour autant, l'accélération du changement climatique appelle à une réactivité et flexibilité plus fortes du système d'innovation de chaque vignoble et à mieux connecter directement ses acteurs, notamment chercheurs et viticulteurs. Les projets de recherche ou d'enseignement, les événements et espaces favorisant la participation à différentes échelles d'une région viticole, et entre régions viticoles, est une condition de l'adaptation. C'est une dimension que mettent en avant les travaux sur les « écosystèmes locaux d'innovation » (Suominen *et al.*, 2019) ;

Encadré II-3-1. Le Plan de filière Val de Loire 2030

Créé en 2019, le Conseil professionnel Val de Loire est le lieu de travail collectif des élus de la filière (2700 vignerons, 410 négociants) et de ses partenaires (chambres d'Agriculture, IFV, pépiniéristes, centres de formation, MSA [Mutualité sociale agricole], Inao...). Associé à un Conseil technique, il a construit un Plan de filière Val de Loire 2030 qui comporte un large volet sur l'adaptation au changement climatique. Ce plan fixe des objectifs de résultats et de moyens jusqu'en 2030, et est réévalué annuellement via une centaine d'indicateurs de suivi. Cette stratégie collective vise à accélérer l'adaptation de la viticulture ligérienne et de ses territoires face au changement climatique.

Deux objectifs majeurs sont ciblés en priorité :

1. Renforcer la connaissance des terroirs viticoles à l'échelle parcellaire d'ici 2030 via la cartographie pour adapter la production des vins, faire évoluer les pratiques et relocaliser certaines parcelles :

- caractérisation des terroirs (1/10 000^e) et du bilan hydrique journalier à la parcelle (modèle Walis), avec 57 600 ha cartographiés en 2022 (87 % du vignoble);
- cartographie des équipements antigel;
- atlas d'indicateurs climatiques et agroclimatiques pour le futur proche et lointain (2050 et 2100), à l'échelle communale en 2022 (100% du vignoble);
- zonage climatique à l'échelle parcellaire pour les AOP intéressées, à partir de 2023;
- plateforme de suivi météorologique dans le cadre du Plan national dépérissement vignoble (PNDV), à partir de 2023.

2. Favoriser un matériel végétal adapté au changement climatique :

- renforcer la sélection et la création variétale, à travers les porte-greffes, cépages et clones;
- introduire des « variétés d'intérêt à fin d'adaptation »;
- conserver et explorer la diversité existante, à travers les cépages patrimoniaux, cépages non ligériens, programmes de prospection et de conservation de nos cépages emblématiques en France et à l'étranger (Chenin, Sauvignon...).

Deux piliers sont renforcés, car essentiels à la réussite de l'adaptation de la filière :

1. Développer la recherche-expérimentation

- Coordination et priorisation des projets en Conseil technique Val de Loire,
- Projets pour tester des systèmes de conduite innovants et consolider l'expertise (Root Loire Valley, Climenvi, Adaclim, Sictag, RedClim*...);

2. Développer le transfert d'information technique, à la fois sur un volet numérique, avec une plateforme collective en libre accès, www.techniloire.com, et avec un calendrier d'évènements pour les vignerons, techniciens et élus de la filière (séminaires prospective, conférences, restitutions des projets R et D, formations techniciens et vignerons, démonstrations, groupes d'échange...).

* Root Loire Valley : Quels porte-greffes face aux enjeux actuels et à venir de la viticulture dans le Val de Loire?; Climenvi (cf. encadré II-5-4); Adaclim : Adaptations viticoles et œnologiques aux conséquences du changement climatique en Val de Loire; Sictag : Système innovant d'aide à la décision connecté et de gestion efficiente en temps réel des tours anti-gel du Val de Loire; RedClim : Réduction de produits phytosanitaires et changement climatique en Val de Loire.

- au-delà de la participation, l'ouverture des systèmes d'innovation à d'autres secteurs, aux collectivités et à la société civile peut être une condition favorable à l'adaptation. Il s'agit de mieux partager les connaissances avec les consommateurs du vin, mais aussi les acteurs concernés par la gestion de ressources locales (foncier, eau...), ou encore d'explorer des solutions plus radicales, y compris la diversification des productions, comme le suggèrent à l'échelle locale les climathons viticoles (chapitre II-5). En ce sens, les systèmes d'innovation des vignobles régionaux, marqués jusque-là par une logique sectorielle, pourraient s'insérer dans un « écosystème local d'adaptation au changement climatique », coanimé avec les collectivités en charge des plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET), ou de conseils citoyens associés ;
- enfin, si l'enjeu climatique suscite différentes orientations pour l'adaptation, avec des options « très technologiques » pouvant s'opposer à des options « très agroécologiques » (Schnebelin et al., 2022), le développement d'une gestion adaptative et concertée des ressources locales apparaît comme une condition majeure. Il s'agit de dépasser une vision conservatrice des terroirs, bouleversés par le changement climatique, pour renouveler leur analyse et engager leur gestion en intégrant des actions d'atténuation et de capture du carbone, pour lesquelles les viticulteurs ont de véritables opportunités (gestion de la logistique, des sols, des paysages...). Il s'agit d'une dimension mise aussi en avant par les travaux sur les écosystèmes locaux d'innovation, promouvant une vision circulaire, ou même « métabolique » du développement.

Dans tous les cas, la capacité des acteurs d'un vignoble régional à construire des écosystèmes locaux sous la forme de réseaux de collaboration plus ouverts entre entreprises, organisations d'enseignement et de recherche, organisations professionnelles, collectivités, société civile... apparaît globalement comme la principale condition pour l'adaptation des vignobles au changement climatique.

LA CONSTRUCTION DES CONNAISSANCES POUR LA FORMATION

*Hervé Hannin, Laure de Rességuier, Laurence David,
Marc Nougier, Jean-Marc Touzard, Frédéric Levraut,
Christel Renaud-Gentié et Côme Isambert*

Introduction

Aux nombreuses qualités du projet Laccave souvent soulignées — générateur de résultats de recherche, fédérateur d'équipes, animateur de réseau, outil de dialogue stratégique avec la profession sur base de prospective —, il faut ajouter la construction de nouvelles capacités afin d'aborder le changement climatique dans les formations, et notamment dans celles qui sont spécialisées sur la filière Vigne et vin. Ce chapitre veut illustrer cette contribution et le rôle essentiel de l'éducation dans la réussite des stratégies face au changement climatique. Le contexte y est favorable. Plusieurs projets de recherche ont vu le jour sur cette thématique ces dernières années, prévoyant un transfert des résultats à travers des canaux de formation, qu'elle soit professionnelle, continue ou initiale³⁶. Par ailleurs, les étudiants qui s'engagent aujourd'hui dans une formation en viticulture ou œnologie ont conscience que les évolutions climatiques pèseront lourd dans leur activité professionnelle. De même, il apparaît clair qu'aucune discipline ne peut fournir seule, par la voix d'un professeur spécialiste, la solution face à un défi complexe comme le changement climatique, et c'est une approche systémique et interdisciplinaire, comme celle qui a guidé Laccave, qui doit prévaloir dans un tel enseignement. Enfin, des changements structurels traversent l'enseignement, avec le développement de pédagogies visant à rendre les apprenants davantage acteurs que récepteurs, l'usage croissant d'outils digitaux et de technologies appropriées au *distance learning* et s'appuyant sur la disponibilité de grands jeux de données (encadré II-4-1), ou encore l'importance accordée aux « innovations pédagogiques » (Le Maître, 2018). Celles-ci répondent à la fois à une certaine lassitude face au cours magistral et à un appétit post-confinement pour de nouvelles propositions plus collectives et ludiques. C'est ainsi que se sont développés dans les écoles d'agronomie, par exemple à Montpellier, des ateliers de « controverses », des classes de pédagogie inversée ou des journées annuelles de « l'innovation pédagogique ».

Dans ce contexte, ce chapitre propose de présenter des offres de formation et des supports pédagogiques innovants, parfois ludiques, adressés à des publics et niveaux divers, qui abordent l'enjeu climatique de la filière Vigne et vin, en déclinant des résultats et démarches issues notamment de Laccave : une formation à destination des enseignants des lycées viticoles, un outil novateur de cartographie interactive, un jeu

36. <http://esr-wikis.adc.education.fr/ca2co/index.php?oldid=1157> (consulté le 11/12/2023).

Encadré II-4-1. Enjeu des données et partage de connaissances

Pour faire face au défi du changement climatique, il est crucial que les viticulteurs partagent leurs connaissances et travaillent ensemble pour trouver des solutions durables. La collecte et l'accès aux données sont ainsi des éléments cruciaux pour le développement de solutions innovantes. Mais pour cela, il faut que cette collecte soit facile et que les données soient bien décrites, accessibles à des communautés larges, sans complexité ni redondance et utilisables pour produire des connaissances nouvelles.

De fait, les données disponibles se multiplient avec l'utilisation des technologies du numérique dans l'ensemble de la chaîne de production viticole, telles que les smartphones, capteurs, drones, équipements connectés, satellites, réseaux sociaux, et plus largement avec l'usage de services informatisés (traçabilité, systèmes d'aide à la décision technique ou économique, informatisation des déclarations...). Que faire de ces données et comment les traiter pour exploiter au mieux les informations au profit des acteurs de la filière et des consommateurs? La combinaison du Big Data à des méthodes d'analyse et de modélisation appropriées (intelligence artificielle, modèles prédictifs...) permet de produire des connaissances nouvelles, de fournir une aide pour prendre une bonne décision ou simplement d'effectuer un diagnostic. Pour être en capacité de développer pleinement ce potentiel, il est donc crucial de structurer les données et d'opérer des liens entre elles.

L'utilisation de nombreuses données pour la compréhension des impacts du changement climatique et l'aide aux décisions d'adaptation requièrent que ces données soient FAIR (Faciles à trouver, Accessibles, Interopérables, Réutilisables), que l'on puisse connaître leur origine et déterminer leur qualité. Des métadonnées standardisées doivent clairement décrire les données pour les comprendre (Quoi? Où? Comment? Quand?), les gérer (informatiquement et administrativement) et les lier. Afin de garantir que des données différentes se complètent et s'enrichissent, il faut s'assurer qu'on « parle » bien de la même chose. Le partage de vocabulaires contrôlés (ontologie) avec une sémantique définie par une description claire précise et concise améliore cette compréhension. Par exemple, les données d'observation, provenant de nombreux sites, peuvent être associées à différentes échelles phénologiques. Si on dispose des informations qui caractérisent les données (métadonnées), il devient possible de réconcilier toutes les données, de les comparer et les exploiter ensemble.

de rôle prospectif et participatif, la valorisation d'un sondage « Quel climat demain dans mes vignes? » adressé par des élèves-ingénieurs à des viticulteurs, et un jeu sérieux abordant l'écoconception participative d'itinéraires techniques viticoles. Ces exemples permettront en conclusion de tirer des enseignements et d'ouvrir des perspectives sur les outils et méthodes pédagogiques favorisant la formation, pour agir dans de nouveaux contextes marqués par le changement climatique.

La mise en place d'une formation à destination des enseignants des lycées viticoles

L'évolution climatique récente et les impacts déjà visibles dans la filière Vigne et vin obligent les organismes de formation à traiter ce sujet en faisant évoluer leurs programmes pédagogiques. Dans ce contexte, et dans une perspective de diffusion large des connaissances

acquises au cours du projet Laccave, une formation à destination des enseignants des lycées viticoles a été développée par l'UMR Écophysiologie et génomique fonctionnelle de la vigne (EGFV). L'objectif est de diffuser les connaissances scientifiques disponibles sur le changement climatique et sur les leviers d'adaptation et d'atténuation dans la filière Vigne et vin aux enseignants des lycées. Cette formation propose aussi un accompagnement pour coconstruire des contenus pédagogiques qui pourront être utilisés dans les nouveaux programmes de formation. Elle a mobilisé une équipe interdisciplinaire de formateurs impliqués dans le projet Laccave, mais aussi des professionnels de la filière. Elle a été construite sur deux journées espacées dans le temps pour permettre un travail accompagné en équipe. Son déroulement s'est fait sur quatre séances.

Séance 1 : connaissance générale du changement climatique au niveau mondial

Cette séance a été réalisée sous forme de cours classiques ponctués de séquences vidéo et d'exercices, permettant aux apprenants d'acquérir des savoirs généraux sur le climat et sa modélisation, l'effet de serre et le changement climatique récent. Des exercices applicatifs ont notamment été consacrés aux indicateurs climatiques et à la disponibilité de la donnée météo.

Séance 2 : le changement climatique dans la filière Vigne et vin

Un premier module a permis d'exposer les conséquences du changement climatique sur le développement de la vigne et la qualité des vins (avancée des stades phénologiques, composition des raisins et des vins, rendement et qualité). La perception du changement climatique par les acteurs de la filière a été ensuite abordée sous deux angles : celle des viticulteurs à partir d'une enquête effectuée à l'échelle mondiale (cf. chapitre II-1), celles des œnologues et consommateurs face à la modification du profil aromatique des vins (cf. chapitres I-4 et II-2).

Séance 3 : adaptation au changement climatique

L'adaptation a été traitée sous forme d'atelier avec des restitutions croisées. Les apprenants ont été répartis par groupes composés d'équipes pédagogiques de lycées différents. Quatre sujets sur l'adaptation ont été retenus :

- les réponses aux aléas climatiques ;
- l'adaptation par le matériel végétal ;
- l'adaptation par les pratiques agronomiques ;
- l'adaptation par les pratiques œnologiques.

L'objectif de chaque groupe était de travailler sur son sujet pour proposer un module de formation, le restituer à l'ensemble de la promotion, puis le mettre en discussion. Chaque groupe devait établir les objectifs pédagogiques de son module et un programme détaillé avec les modalités de transmission des savoirs (cours magistraux, travaux pratiques, travaux dirigés, expérimentations de terrain, etc.). Chaque groupe était accompagné par deux experts du sujet, disponibles pour échanger et accompagner la réflexion.

Outre l'acquisition de connaissances sur l'adaptation, ce module permettait aux enseignants des lycées de coconstruire de futurs programmes pédagogiques sur ces aspects

et d'échanger avec leurs collègues. La restitution croisée s'est déroulée lors de la deuxième journée, accompagnée par l'ensemble des tuteurs impliqués dans le suivi des groupes, ceux-ci pouvant apporter des compléments d'information.

Séance 4 : évolution règlementaire face au changement climatique

Une intervention de l'Inao a permis d'aborder le lien entre l'adaptation et l'évolution règlementaire en France.

Séance 5 : atténuation du changement climatique

Les actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre qui peuvent être mises en place au sein des exploitations vitivinicoles ont été abordées par trois interventions complémentaires, suivies de discussions :

- les résultats des « bilans carbone » effectués par le Conseil interprofessionnel des vins de Bordeaux, et les actions mises en place pour limiter l'empreinte carbone de la filière;
- les résultats du projet de recherche Life-Adviclim, sur l'évaluation des gaz à effet de serre émis par les pratiques viticoles à l'échelle parcellaire;
- le retour d'expérience d'un château très impliqué dans la réduction de son empreinte carbone.

La formation s'est terminée par une évaluation des apprenants sur le contenu pédagogique et le déroulé de ce module. Cette évaluation permettra de faire évoluer la formation en répondant aux attentes des enseignants des lycées viticoles sur le changement climatique et sur l'adaptation, et de renforcer les ressources pédagogiques disponibles.

Un outil de cartographie interactive pour l'étude des terroirs dans le contexte du changement climatique

La valorisation d'un projet de recherche va au-delà des seuls rapports scientifiques et connaissances académiques. Des vecteurs d'informations accessibles sont donc à imaginer dans une démarche d'ouverture vers la société civile.

L'ouverture de la recherche vers la filière Vigne et vin

C'est dans cet esprit qu'une *storymap*³⁷ a été développée pour donner à voir les résultats du projet Life-Adviclim aux acteurs de la filière Vigne et vin. Ce support présente également un très fort potentiel pédagogique en fournissant une illustration spatialisée, sur un terroir, des enseignements prodigués par les enseignants des lycées viticoles.

Le choix d'une plateforme facile d'utilisation

Ces dernières années, l'émergence des outils de narration cartographique a fait un bond significatif grâce au développement de plusieurs plateformes (Caquard et Dimitrovas,

37. <https://www-iuem.univ-brest.fr/wapps/letg/adviclim/BDX/#>.

2017). Nous avons choisi d'utiliser la *webapp* d'Esri³⁸ pour l'exploitation aisée des cartes produites avec cet outil et la possibilité de les mettre en « conversation » avec toute l'iconographie issue des résultats du projet.

Les différents volets de cette recherche (site d'étude, climats locaux, modélisation climatique, phénologie de la vigne actuelle et future, adaptation et atténuation des GES) constituent le fil narrateur. Un effort de synthèse et de vulgarisation a été nécessaire pour imaginer des niveaux de lecture adaptés aux différents lecteurs : du plus accessible en « accroche » aux résultats plus complexes présentés *via* les articles scientifiques. Les cartes y sont interactives et les données qui les composent sont interrogeables par le lecteur. En complément, photos, vidéos, liens hypertextes et commentaires viennent enrichir la narration.

Une diffusion aux professionnels et aux étudiants

L'outil a été dévoilé aux professionnels à Bordeaux en 2019, lors de la journée de restitution du projet Life-Adviclim. À l'issue de la journée, leurs retours ont été pris en compte, comme la complexité résiduelle de certains éléments présentés. Il fait l'objet d'un article spécifique, paru dans la revue technique *International Viticulture and Enology Society* (David *et al.*, 2023). Depuis sa mise en ligne, cet outil et sa version anglaise totalisent plusieurs milliers de visites.

Lors de la formation des enseignants de lycées viticoles (voir plus haut), la *storymap* a été présentée comme un outil pédagogique pouvant servir de support lors des travaux pratiques qu'ils proposent à leurs élèves, afin d'aider ceux-ci à appréhender le changement climatique dans la filière Vigne et vin.

Dans l'enseignement supérieur, elle est utilisée par les étudiants de Bordeaux Sciences Agro (option viticulture-œnologie) comme ressource d'informations sur la thématique du changement climatique.

À terme, cet outil pourrait servir de socle au développement d'un support pédagogique spécifique pour l'enseignement de cette thématique.

Le jeu de rôle prospectif et participatif comme sensibilisation à l'adaptation au changement climatique

L'Institut Agro Montpellier propose sept parcours de formation (pour 280 étudiants) sur la thématique « vigne et vin », emblématique de cette école depuis 150 ans. À partir de 2019, un module nouveau d'enseignement dédié au changement climatique a été organisé pour les 30 élèves-ingénieurs de l'option Viticulture-œnologie. Par une approche interdisciplinaire, ils sont invités à saisir la complexité des jeux d'acteurs et la place possible de réflexions participatives sur base de scénarios prospectifs. Ce module valorise directement les travaux du projet Laccave, en particulier les événements participatifs réalisés à l'échelle locale (chapitre II-5) et la prospective nationale (chapitre II-7) (Aigrain *et al.*, 2016a).

38. <https://www.esri.com>.

L'objectif est de mettre les étudiants en situation afin de les rendre davantage conscients des enjeux, impacts et risques liés au changement climatique pour la filière, mais aussi de les sensibiliser aux vertus des approches prospectives et participatives comme outils d'élaboration de stratégies d'adaptation. Il s'agit aussi de leur faire comprendre la place de l'innovation dans une filière qui, à la fois, la réclame pour relever les grands défis actuels et s'en défend au nom d'un usage parfois immodéré de la « tradition »...

L'intégration interdisciplinaire est ici adossée à une démarche « prospective » de nature à faciliter la représentation du système, visualiser des avenir « possibles », responsabiliser les acteurs, et faire émerger des décisions stratégiques et des actions concrètes. Cette méthode a été utilisée au sein du projet Laccave pour élaborer des scénarios face au changement climatique, en associant plus de 450 professionnels de la filière (chapitre II-7 ; Aigrain *et al.*, 2016b). Une initiation préalable aux principes de la prospective est conseillée sur un format réduit (2 heures), puis le module s'organise en quatre séances d'une demi-journée.

Séance 1 : acquérir des connaissances

Le professeur présente d'abord les enjeux du changement climatique pour la filière, les impacts et leviers pour l'adaptation et l'atténuation. Les étudiants identifient ensuite, dans cet exposé, des pistes d'approfondissements scientifiques qu'ils vont se répartir. Ils préparent en groupe un exposé, à partir de documents déposés sur la plateforme pédagogique et de leurs notes de cours disciplinaires préalables. Les étudiants exposent alors à la classe (inversée) ces approfondissements essentiels pour partager la réflexion.

Séance 2 : mettre en évidence les relations entre acteurs et le besoin de concertation par un jeu de rôles

Les étudiants sont répartis en groupes qui doivent incarner respectivement des rôles (imposés) d'acteurs distincts de la filière, appelés à mettre en place des mesures d'adaptation. Exemple : « Vous êtes... un vigneron bio en AOC Languedoc... un syndicat d'AOC... » Chaque groupe dispose d'une fiche précisant sa situation, ses objectifs, ses contraintes, ses éventuels projets et relations avec d'autres acteurs, incarnés ou non dans le jeu de rôle. La séance se déroule en quatre temps :

- **1^{er} temps** : chaque groupe doit comprendre l'activité de l'acteur et réfléchir à des pistes d'adaptation. Certains freins identifiés impliquent de dialoguer avec un autre acteur (incarné par un autre groupe), à rencontrer dans un deuxième temps ;
- **2^e temps** : chaque groupe est scindé en deux. Un demi-groupe interroge un des deux groupes d'acteurs pour poser les questions préparées. L'autre demi-groupe répond aux interrogations d'un autre demi-groupe visitant ;
- **3^e temps** : les groupes reformés préparent une synthèse des rencontres, de leurs progrès, des freins qui subsistent. Ils produisent ensuite quatre diapositives présentant les enjeux spécifiques de son acteur, les objectifs identifiés, les leviers d'action et freins rencontrés, le bilan des rencontres avec d'autres acteurs ;
- **4^e temps** : les groupes restituent leurs travaux et conclusions à partir des diapositives projetées. Un débat avec les autres étudiants et les enseignants permet de tirer collectivement des conclusions.

Lors de la dernière heure, le professeur expose la construction de la stratégie nationale, telle qu'elle a été échafaudée sur la base de l'exercice de prospective conduit au sein de Laccave³⁹ et présentée au ministre de l'Agriculture en août 2021 (chapitre II-7; Hannin et al., 2021).

Séance 3 : analyser une situation réelle en exploitation vitivinicole

En profitant de rencontres prévues par ailleurs avec un vigneron (ou en créant *de novo* cette occasion), les étudiants analysent la question du changement climatique dans une exploitation vitivinicole pour présenter un diagnostic et des préconisations pour l'adaptation et l'atténuation. Ces cas réels donnent lieu à présentations devant la classe, à débats entre étudiants et échanges avec les enseignants.

Séance 4 : organiser un évènement professionnel

Les étudiants organisent une conférence et y invitent d'autres étudiants, leurs enseignants et des acteurs professionnels, dont certains (environ 6) sont appelés à participer à une table ronde. Les étudiants présentent une synthèse des enjeux, l'état d'élaboration des stratégies nationales et internationales de la filière Vigne et vin, d'adaptation et d'atténuation. Chaque groupe expose successivement les résultats actualisés du jeu de rôle de la séance 2. Ces exposés donnent lieu à des réactions de la table ronde animée par deux étudiants. Sur un mode ludique, un prix peut être attribué, par la table ronde transformée en jury, au rôle le plus convaincant.

Une séance finale permet de recueillir l'appréciation des étudiants. Associant idéalement tous les enseignants du cursus, cette séance donne l'occasion de réfléchir collectivement à la façon de mieux intégrer la question du changement climatique dans le programme des enseignements.

Une prospective agroclimatique réalisée par des élèves ingénieurs pour un territoire viticole

Les besoins des organismes de conseil agricole en matière d'adaptation des filières au changement climatique peuvent rejoindre les impératifs de formation d'élèves ingénieurs. Telle est la démonstration que veut faire l'opération « Quel climat demain dans mes vignes ? », qui implique annuellement un groupe d'élèves ingénieurs dans un audit d'exploitations viticoles. Initiée en 2021, et issue d'un partenariat entre les chambres d'Agriculture et l'école d'ingénieurs UniLaSalle Rouen, cette opération combine :

- la confrontation d'élèves ingénieurs à des situations viticoles réelles ;
- la réalisation de livrables utilisables par un organisme de conseil agricole ;
- l'intégration de ce travail dans l'action plus large d'une organisation agricole (chambre d'Agriculture) en matière d'adaptation de la viticulture.

39. Par le *workpackage* de prospective piloté à partir de 2013 par l'Inra (aujourd'hui INRAE), Montpellier SupAgro, FranceAgriMer et l'Inao.

Déroulé de l'opération

Des viticulteurs (une vingtaine chaque année) sont identifiés par la chambre d'Agriculture partenaire pour leur intérêt vis-à-vis de l'opération. Chaque viticulteur est ensuite questionné (entretien d'une heure) par un binôme d'élèves, afin d'alimenter les différentes composantes de l'audit. Puis, durant une semaine environ, chaque binôme d'élèves analyse « son » exploitation viticole en suivant une démarche commune à toutes les exploitations viticoles impliquées. Enfin, les livrables sont mis en forme, contrôlés par les encadrants de l'exercice, et remis à l'organisme de développement agricole partenaire.

Analyse des ressentis des viticulteurs vis-à-vis des évolutions passées

La première partie de l'audit porte sur le ressenti de chaque viticulteur quant aux évolutions climatiques et aux impacts viticoles déjà constatés dans son exploitation. Il s'agit de ressentis, donc pouvant comporter des biais par rapport aux évolutions réelles. L'analyse opérée par les élèves ingénieurs consiste, pour chaque question posée, à :

- élaborer une statistique sur les réponses de l'ensemble des vigneron enquêtés, de façon à identifier un éventuel biais collectif de ressenti ;
- identifier si l'Observatoire régional sur l'agriculture et le changement climatique (Oracle) dont dépend le territoire enquêté contient un indicateur apportant une réponse objective, puis à expliciter cette objectivation.

Sondage sur les avis des viticulteurs vis-à-vis de la stratégie nationale de la filière Vigne et vin

La deuxième partie de l'audit porte sur l'avis des viticulteurs au sujet des leviers d'adaptation au changement climatique listés dans la « Stratégie de la filière Vigne et vin face au changement climatique », validée en 2021 par l'Inao, FranceAgriMer, INRAE et l'IFV (chapitre II-7). Ces avis sont exprimés assortis d'un degré d'adhésion ou d'opposition. L'analyse effectuée par les élèves ingénieurs consiste d'abord, pour chaque question posée, à faire une statistique sur les réponses de l'ensemble des vigneron enquêtés, puis à hiérarchiser dans le territoire étudié l'adhésion collective aux différents leviers d'adaptations proposés.

Prospective climatique sur les impacts viticoles et l'adaptation à l'échelle locale

La troisième partie de l'audit porte sur les impacts futurs du changement climatique et les voies d'adaptation à l'échelle de chaque exploitation viticole. Chaque viticulteur fait le choix de 5 enjeux prioritaires d'adaptation, parmi les 15 proposés. Les élèves ingénieurs analysent l'évolution future des indicateurs agroclimatiques relatifs à ces enjeux au moyen de projections climatiques issues de la plateforme « Drias – Les futurs du climat » pour le point de grille Safran le plus proche de l'exploitation viticole étudiée. Les calculs sont opérés sous Excel, au moyen de fichiers issus de la dynamique ClimA-XXI couvrant 70 départements en France métropolitaine (encadré II-4-2). En fonction de l'évolution future de ces indicateurs, les élèves ingénieurs proposent des voies d'adaptation à partir d'un travail bibliographique préalable.

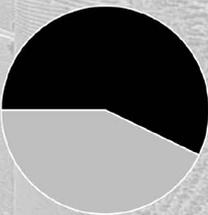
Le changement climatique et ses impacts déjà observés dans les exploitations viticoles de Bourgogne Franche-Comté.

Question 3 : sur l'ensemble de l'année, les jours très chauds (>=30°C) vous semblent-ils actuellement :

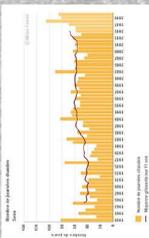
Le ressenti des 10 viticulteurs de BFC interrogés en 2021



- Beaucoup plus nombreux qu'autrefois ? X
- Un peu plus nombreux qu'autrefois ?
- Ni plus ni moins nombreux qu'autrefois ?
- Un peu plus rares qu'autrefois ?
- Beaucoup plus rares qu'autrefois ?
- Je ne me prononce pas



- Beaucoup plus nombreux qu'autrefois
- Un peu plus nombreux qu'autrefois



◀ Ce que révèle ORACLE Bourgogne Franche-Comté

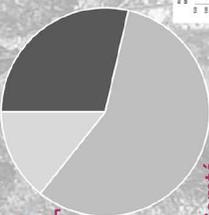
A Sens, le nombre de jours chauds (>= 25°C) par an a quasiment doublé depuis 1960.

Question 4 : sur l'ensemble de l'année, les jours froids (<=0°C) vous semblent-ils actuellement :

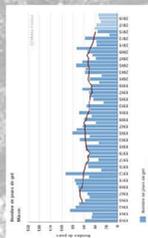
Le ressenti des 10 viticulteurs de BFC interrogés en 2021



- Beaucoup plus nombreux qu'autrefois ?
- Un peu plus nombreux qu'autrefois ?
- Ni plus ni moins nombreux qu'autrefois ?
- Un peu plus rares qu'autrefois ? X
- Beaucoup plus rares qu'autrefois ?
- Je ne me prononce pas



- Un peu plus nombreux qu'autrefois
- Un peu plus rares qu'autrefois
- Beaucoup plus rares qu'autrefois



◀ Ce que révèle ORACLE Bourgogne Franche-Comté

A Mâcon, le nombre de jours de gel par an a nettement diminué depuis 1960.

Domaine viticole Courrey à Chablis

Opération "Quel climat demain dans mes vignes ?" CFA Bourgogne Franche-Comté



Figure II-4-2. Pages intérieures de la synthèse restituée par les étudiants, consacrée aux ressentis des viticulteurs quant aux évolutions climatiques et aux impacts déjà constatés dans leur exploitation.

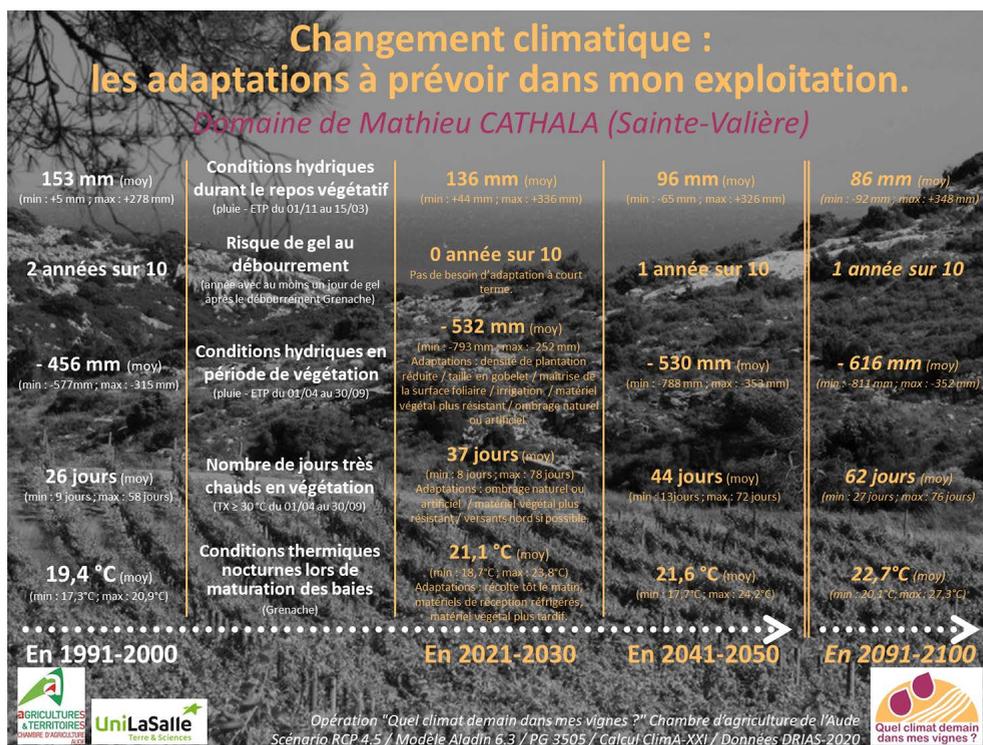


Figure II-4-4. Exemple de synthèse restituée par les étudiants, consacrée ici aux impacts et enjeux d'adaptation futurs d'une exploitation viticole donnée.

Restitution

L'étude se conclut par une restitution orale réalisée par les élèves ingénieurs devant les partenaires de l'opération (viticulteurs et conseillers viticoles). Chaque viticulteur reçoit les trois livrables traitant de son cas spécifique et l'organisme partenaire peut ensuite envisager un déploiement à davantage de viticulteurs.

Nouveaux acquis pour les élèves ingénieurs

Cet exercice apporte aux élèves ingénieurs un corpus de compétences, constitutifs de l'ingénierie d'adaptation au changement climatique d'une filière agricole, qui permet de :

- valoriser les bases scientifiques précédemment acquises, que sont les choix de scénarios RCP, la caractérisation du climat futur, les impacts sur la phénologie et la croissance de la vigne, les leviers d'adaptation ;
- maîtriser l'environnement technique des projections agroclimatiques, par l'utilisation de la plateforme Drias, le calcul et l'interprétation d'indicateurs agroclimatiques ;
- mettre en forme les résultats à destination d'acteurs de terrain.

Encadré II-4-2. ClimA-XXI, un outil pour anticiper à l'échelle locale l'adaptation de l'agriculture au changement climatique

Caractéristiques générales

Nom complet : Climat et Agriculture au XXI^e siècle

Objectif : caractérisation locale de la faisabilité des productions agricoles au cours du XXI^e siècle

Descripteurs analysés : indicateurs climatiques et agroclimatiques

Service climatique mobilisé : plateforme « Drias – Les futurs du climat »

Scénarios RCP utilisés : 2.6 / 4.5 / 8.5

Horizons temporels analysés : 1976-2005, 2021-2050 et 2071-2100 (toute autre période de 30 ans possible)

Modèle climatique utilisé : Aladin 6.3 (tout modèle Eurocordex possible).

Mode cartographique : analyse par point de grille SAFRAN

Couverture géographique : France métropolitaine (outre-mer possible)

Date de création : 2015, mises à jour en 2017 puis 2020

Support logiciel : Excel

Nombre d'utilisateurs : environ 150 au 1^{er} mars 2023

Accès à l'outil

Formation : obligatoire (payante, durée de deux jours, organisme formateur Resolia)

Licence d'utilisation : gratuite

Organismes concernés : chambres d'Agriculture, autres structures de formation et de conseil agricole

Utilisation de l'outil

Format : un fichier Excel par cas de figure étudié (point de grille Safran / indicateur agroclimatique / scénario RCP) et regroupement des fichiers par dossier (par client, par mission...)

Exemples d'analyses : audits d'exploitation agricole, stratégies de filière, vulnérabilités de territoires

Types de valorisation : sensibilisation/information, formation continue, formation initiale, conseil agricole

Animation du réseau des utilisateurs

Communication sur les évolutions de l'outil

Diffusion de fiches : « Les notices ClimA-XXI »

Animation : journées « Les rencontres ClimA-XXI »

Évolutions de l'outil

Mise en place de versions Expert avec fichiers de calcul plus complets et structuration par thématique d'adaptation ClimA-XXI / Viticulture : réalisé

Motivations de l'organisme agricole partenaire

Pour un organisme déjà impliqué dans l'adaptation, cette opération éclaire notamment sur :

- la possibilité de massification de l'information et du conseil aux viticulteurs ;
- les axes de la « Stratégie de la filière Vigne et vin face au changement climatique » à promouvoir localement et les interactions à avoir avec les porteurs nationaux de cette stratégie ;
- les besoins en accompagnement individuel des viticulteurs.

Éléments de vigilance et perspectives

La vigilance de l'encadrement doit porter sur deux points :

- certaines composantes du travail étant imposées (par ex. le format des livrables), des espaces significatifs d'initiative et de réflexion doivent être laissés aux élèves (par ex. dans la construction des fichiers de calcul d'indicateurs agroclimatiques) ;
- les livrables étant diffusés aux viticulteurs impliqués, un contrôle approfondi des documents produits par les élèves doit être réalisé par les encadrants pour garantir une qualité appropriée.

En termes de perspectives, signalons que dans l'hypothèse d'un déploiement géographique suffisant, l'opération « Quel climat demain dans mes vignes ? » peut alimenter en remontées de terrain la « Stratégie nationale de la filière Vigne et vin face au changement climatique ».

Vitigame, un jeu sérieux pour sensibiliser aux leviers de réduction des impacts environnementaux

L'École supérieure des agricultures (ESA) à Angers forme annuellement 250 apprenants dans le secteur vitivinicole : BTS en enseignement à distance, licence professionnelle, master international, ingénieur agronome « majeure vigne et vin ». L'unité de recherches USC GRAPPE⁴⁰ (ESA-INRAE) développe depuis 2010 l'évaluation des pratiques viticoles par l'analyse du cycle de vie (ACV), méthode d'évaluation environnementale complète et internationalement reconnue, incluant l'impact du réchauffement climatique et l'écoconception participative en viticulture (Perrin *et al.*, 2022). Le projet de recherches Eco3vic⁴¹ et la thèse d'A. Rouault ont établi une démarche d'écoconception participative en viticulture basée sur l'ACV (Rouault *et al.*, 2020). Le prototype de jeu sérieux créé pour les ateliers d'écoconception avec les vignerons a montré son intérêt pour la pédagogie, conduisant aujourd'hui à la mallette de jeu *Vitigame* complétée par Vit'LCA, le calculateur d'ACV pour la viticulture, mis au point dans l'équipe. Aujourd'hui, leur utilisation en enseignement, conseil, animation ou réflexion prospective contribue à transmettre l'écoconception participative auprès des conseillers, enseignants, étudiants et vignerons.

40. Groupe de recherche en agroalimentaire sur les produits et les procédés.

41. Écoconception collective pour l'accompagnement au changement de pratiques en viticulture.

Un jeu sérieux pour l'écoconception participative en viticulture

Vitigame, à travers une forme pédagogique innovante et motivante, sensibilise les joueurs, connaissant la viticulture, aux impacts environnementaux et aux leviers d'atténuation dans la gestion d'un itinéraire technique annuel viticole pour qu'ils soient mobilisés dans leurs futures décisions techniques ou stratégiques.

Basé sur des cas réels viticoles en production raisonnée et biologique, *Vitigame* comporte des fiches décrivant la parcelle, l'itinéraire technique réalisé et ses résultats d'ACV, un plateau de jeu, des cartes par opération et des barrettes météo par période de 4 jours intégrant les risques sanitaires, le stade phénologique, la pluviométrie et les prévisions météo. Trois livrets présentent les règles du jeu, les causes des impacts environnementaux et des solutions d'atténuation, ainsi que les matières actives et produits phytosanitaires disponibles, leurs impacts et des clés d'optimisation des doses. Un accès à Vit'LCA permet les calculs.

Vitigame se joue par tables de 6 à 8 joueurs, où chaque étudiant occupe un rôle différent avec un maître de jeu connaissant la viticulture et formé à l'ACV et à *Vitigame* (fig. II-4.5).



Figure II-4.5. Le jeu sérieux *Vitigame*. © Anthony Congnard.

Trois étapes se succèdent :

1. Le maître de jeu présente l'itinéraire technique choisi, ses impacts et leurs causes, et les stratégies d'atténuation des impacts proposées avec leurs leviers techniques. Le groupe se concerta, choisit une stratégie, les modes d'entretien du sol et peut acheter des leviers supplémentaires d'atténuation ;
2. L'itinéraire technique est écoconçu, opération par opération, en tenant compte des informations des barrettes météo. Le maître de jeu veille au respect de la chronologie des interventions au vignoble, alerte sur les risques et sanctionne le cas échéant par des « attaques mildiou ou oïdium ». Plusieurs tables peuvent travailler sur le même cas en parallèle pour comparer l'efficacité des stratégies choisies ;

3. Trois échanges réflexifs sur l'itinéraire construit ont lieu : sur les choix faits par les joueurs et leurs effets (sanitaires, rendement et qualité), sur la base de l'expertise du maître de jeu ; chaque table présente aux autres ses choix avec explication des stratégies choisies et discussion ; les maîtres de jeu restituent les résultats de l'évaluation environnementale par ACV des itinéraires écoconçus en comparaison des cas initiaux calculés dans le logiciel Vit'LCA.

À l'ESA, une séance de jeu est insérée en 2^e année du BTS Viticulture-œnologie et en 3^e année du cursus ingénieurs agronomes, après des cours de sensibilisation à l'ACV et à l'écoconception en viticulture. Quel que soit le public, *Vitigame* permet une meilleure sensibilisation aux enjeux environnementaux et aux leviers d'atténuation, et reste une occasion unique au cours de la formation de construire un itinéraire technique viticole complet dans un cadre de contraintes multiples. Les résultats sont significatifs puisque les baisses d'impacts obtenues par les étudiants sont en moyenne de 20 à 30 %, résultat proche de celui des ateliers de vigneron.

Suite à ces prises de conscience, nous notons une tendance croissante à la prise en compte de la dimension environnementale et à la mobilisation de l'ACV et de l'écoconception dans les mémoires de fin d'études en viticulture des élèves ingénieurs. *Vitigame* est disponible à la vente depuis janvier 2023 et des formations ont débuté pour les enseignants, entreprises et conseillers de terrain qui souhaitent l'utiliser (Renaud-Gentié et al., 2022).

Perspectives

Le projet de recherche *Vitarbae* (2023-2026) prévoit la création d'un parcours d'accompagnement complet pour l'enseignement et les conseils viticoles et arboricoles basé sur les jeux sérieux. Il inclura, en viticulture, *Vitigame* et un jeu à créer sur l'implantation du vignoble, mobilisant les leviers d'atténuation, l'évaluation économique du changement de pratiques, l'impact sur la biodiversité et une simplification de l'accès aux résultats d'ACV pour la décision. Enfin, une traduction du jeu en anglais permettrait sa mobilisation dans les formations en anglais et une diffusion internationale.

Conclusion

Les innovations pédagogiques présentées dans ce chapitre illustrent, avec des objectifs, des publics et des angles distincts, différentes manières à la fois de valoriser des résultats de recherche dans le domaine du changement climatique et de répondre aux attentes de la filière face à cet enjeu de grande importance. Elles ne prétendent pas couvrir l'ensemble des initiatives récentes et sont elles-mêmes naturellement en constante évolution. Les collaborations au sein des réseaux pédagogiques et leur renforcement à la faveur des projets de recherche impliquant les enseignants-chercheurs favoriseront le développement et les améliorations de ces initiatives.

Il est assez remarquable que toutes ces innovations présentent à la fois des modernisations de forme ou de méthodes pédagogiques, et des propositions visant à renforcer les compétences pour faire face au changement climatique. Ces propositions se révèlent rapidement complexes, et donc appellent des approches interdisciplinaires. Cette orientation interdisciplinaire pousse alors à imaginer des modules différents des cours disciplinaires, généralement plus classiques, prodigués par les enseignants.

Ces dispositifs permettent aussi aux étudiants de se projeter dans des situations professionnelles futures et donc d'anticiper sur l'évolution des métiers, tous affectés par le changement climatique, du producteur au conseiller, mais avec des particularités...

Plus fondamentalement, ces évolutions peuvent être interprétées avec un regard prospectif comme des « signaux faibles » sans doute annonciateurs de changements plus profonds. D'abord, elles confirment un appétit des étudiants pour des formes pédagogiques innovantes plus conviviales et plus ludiques. Surtout, elles répondent à une aspiration de ces étudiants, futurs professionnels, à ne pas être de simples récepteurs de cours prodigués *top down* (l'enseignement dit vertical), mais plutôt à être accompagnés dans l'exercice interdisciplinaire d'assemblage des connaissances et dans l'utilisation de ces connaissances. Celles-ci pourront de moins en moins s'apparenter à des recettes mais viendront au contraire constituer un mélange d'informations, autant transversales que descendantes, vouées à alimenter une réflexion stratégique ou opérationnelle, nécessairement collective.

Ces considérations se révèlent cohérentes avec les visions sur l'évolution des métiers qui sont développées dans les prospectives (Aigrain *et al.*, 2023) ou au sein du *think tank* qu'est la chaire d'entreprises Vigne et vin à l'Institut Agro Montpellier (Touzard et Hannin, 2023). Les vigneron·ne·s de demain y apparaissent généralement associés collectivement dans des réseaux opérationnels, interconnectés, en capacité de travailler en bonne intelligence avec la Recherche et les Instituts porteurs d'innovations ; ils ne disposeront pas de solutions « clef en main », ni de panacées face au changement climatique, ni de « vaccins » face aux maladies et ravageurs émergents qui menacent le vignoble de la même façon et concomitamment.

Ces initiatives pionnières mettent en lumière un enjeu majeur des établissements d'enseignement et de formation concernés par les métiers de la vigne et du vin : à côté de nécessaires cours magistraux disciplinaires, ceux-ci doivent proposer des situations pédagogiques qui vont préparer les futurs professionnels de la filière à agir dans un contexte encore largement inconnu, et marqué par un changement structurel de modèle de production, de travail, de construction de connaissance pour l'action.

Il faudra aussi sans doute associer, et peut-être intégrer, les connaissances pour l'adaptation à d'autres grands enjeux, tels que la sortie des pesticides, la transition numérique et les nouveaux marchés mondiaux du vin...

FAIRE ÉMERGER L'ACTION CLIMATIQUE À L'ÉCHELLE LOCALE : L'EXEMPLE DES CLIMATHONS VITICOLES

Nina Graveline, Marc Nougier et Jean-Marc Touzard

Introduction

L'accélération du changement climatique appelle à produire des connaissances sur l'action climatique, une notion qui recouvre aussi bien les actions d'atténuation des émissions de gaz à effets de serre que celles qui visent l'adaptation des activités humaines et des écosystèmes (Solecki *et al.*, 2018). Pour les actions collectives, l'échelle locale est mise en avant (Joshi *et al.*, 2022), en particulier dans le secteur viticole où la qualité des produits s'est construite à travers la notion de *terroir*, qui intègre des conditions locales de production, dont le climat (Casabianca *et al.*, 2016). Pour s'adapter, il apparaît important d'explorer, combiner et mettre en œuvre rapidement des innovations et des changements qui doivent non seulement prendre en compte les impacts locaux de la crise climatique, mais aussi s'appuyer sur des échanges avec les acteurs liés à ce terroir. La réorganisation d'un vignoble et la mobilisation de ressources telles que la terre (le foncier et ses caractéristiques pédoclimatiques), l'eau ou des éléments du paysage concernent en effet de nombreux acteurs locaux. Il s'agit aussi de jouer sur la diversité de leurs connaissances et réseaux, pour ouvrir le champ des solutions et accélérer l'action climatique individuelle et collective.

Cet enjeu d'ouverture et de mobilisation locale face au climat a incité la Climate-KIC⁴² de l'Union européenne à lancer en 2015 un évènement mondial qui s'adresse à des villes candidates : le climathon. Reprenant les principes des « hackathons », qui visent à stimuler la créativité et l'intelligence collective pour résoudre un problème en 24 heures, le plus souvent en informatique, le climathon s'organise à l'échelle d'une ville, pour favoriser l'émergence de solutions face au changement climatique, par exemple pour les transports, l'énergie, ou l'urbanisme... En partant des premiers résultats du projet Laccave, qui pointaient l'importance des stratégies d'adaptation à l'échelle locale (Barbeau *et al.*, 2015; Ollat *et al.*, 2016), nous avons rejoint l'initiative du climathon et adapté, puis expérimenté cette démarche à l'échelle de plusieurs communes viticoles. Comment mobiliser en 24 heures les acteurs d'une commune viticole pour faire émerger et lancer des actions collectives face à l'enjeu climatique? Quels impacts et enseignements a-t-on pu tirer de ces expériences?

42. La Climate-KIC est une « communauté de connaissance et d'innovation qui s'efforce d'accélérer la transition vers une société zéro carbone et résiliente au changement climatique ». Elle est financée par l'Institut européen d'innovation et de technologie.

Ce chapitre présente la démarche testée successivement en 2018, 2020 et 2021, dans trois communes viticoles de l'Hérault, pour en tirer des enseignements sur les méthodes de facilitation de l'action climatique à l'échelle d'un vignoble. Dans un premier temps, nous reviendrons sur les enjeux et méthodes visant à mobiliser les acteurs à l'échelle locale pour l'action climatique. Nous présenterons ensuite la démarche mise en œuvre dans le cadre du climathon, ainsi que les caractéristiques des communes viticoles retenues. Le déroulement, les résultats et les impacts de ces climathons viticoles seront alors précisés, puis discutés, ouvrant des perspectives pour leur développement futur.

Encadré II-5-1. Une diversité de démarches participatives dans les vignobles français

Dans le cadre du projet Laccave, une étude a été conduite en 2020 sur les démarches participatives engagées dans les vignobles français (Gourvenec, 2021). Les représentants de 180 organisations liées à la viticulture ont été consultés par une enquête en ligne, couvrant toutes les régions viticoles. Près d'un tiers ont indiqué avoir participé à, ou connaître, des projets ayant une dimension participative et prenant en compte l'enjeu climatique. Au total, 76 projets ont été cités, avec différents niveaux de participation, depuis la simple consultation de viticulteurs, jusqu'à la coconstruction ou le copilotage d'actions. Une typologie des projets a été réalisée, prenant en compte leurs objectifs, échelles, durées, degrés d'ouverture et d'implication des participants.

1. Réseaux de partage de connaissances et d'expérimentations entre viticulteurs

Ciblés sur l'observation de variétés ou pratiques viticoles, ils sont portés par un groupement d'intérêt économique et environnemental (GIEE), une association, un groupe au sein d'une coopérative, d'une interprofession ou d'un organisme de défense et de gestion d'une appellation (ODG). Ils ont leur propre dynamique mais peuvent être suivis par un conseiller technique ou la recherche : GIEE La Clape (11), GIEE/coop Roy René (13), ClubMedoc (33), Civam (Centre d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural) Occitanie (66), GIEE Westhalten (68)...

2. Évènements créatifs locaux multiacteurs

À l'initiative de collectivités ou d'organisations viticoles, ces évènements rassemblent une diversité d'acteurs d'un territoire, sur un ou deux jours, pour faire émerger des solutions. Ils associent activités conviviales et créatives : climathons (34), Forum Ventoux (84 ; encadré II-5-3), hackathon champenois (51).

3. Construction d'une stratégie climat pour une filière Vigne et vin

Ces projets sont pilotés par une interprofession ou un syndicat pour redéfinir ses actions. Ils combinent, sur plusieurs mois, expertises, communication et ateliers participatifs, souvent limités aux acteurs viticoles : projets CIVB, CIVC, InterRhône, Interloire (encadré II-3-1), AOP Languedoc...

4. Prospective et recherche participative régionale ou nationale

Ces opérations associent la recherche et des organisations viticoles (FranceAgriMer, Interprofession, chambre d'Agriculture...) pour conduire une prospective ouverte, à portée stratégique et souvent multirégionale (forums régionaux Laccave, sites et ateliers Climenvi [37, 41, 18]) (encadré II-5-4 ; chapitre II-7).

•••



5. Contributions à une politique climatique territoriale

Les viticulteurs et leurs organisations participent à l'élaboration de plans climat (PCAET) ou de gestion d'un territoire, avec souvent un rôle limité à des phases de consultation (PCAET Grand Narbonne [11], PCAET Rhin et Vignoble Grand Ballon [68], plan paysage Beaujolais [69], Scot [schéma de cohérence territoriale] Haute Gironde [33]).

6. Recherche-action et coconception participative

Ces projets de recherche s'appuient sur un groupe de viticulteurs pour coconstruire et évaluer des systèmes innovants ou des mesures d'adaptation : site atelier Bachus (33), thèse d'A. Naulleau (34)... (chapitre II-6).

7. Living labs ou clusters vitivinicoles

Ces projets associent sur le long terme des entreprises viticoles, fournisseurs, *startups*, organisations de recherche ou développement pour expérimenter des technologies, équipements ou services innovants pouvant contribuer à l'adaptation : projet Occitanum (34, 81), VitiREV (33)...

8. Projet de science participative ou *crowdsourcing*

Ces dispositifs pilotés par la recherche mobilisent un réseau de viticulteurs pour fournir des informations sur l'impact du changement climatique dans les vignobles, selon cépages et pratiques : observatoire des saisons, projet Phenoclim, réseau Oscar...

Renouveler les démarches participatives à l'échelle locale : enjeu pour l'action climatique dans les vignobles

Dans le deuxième chapitre de son 6^e rapport, le Giec met en avant une série de recommandations pour favoriser la résilience et l'adaptation des activités humaines face à la crise climatique. Le rapport souligne notamment l'urgence de développer des actions « inclusives, participatives et multisectorielles » à l'échelle locale et régionale, en cohérence avec le renforcement d'une gouvernance climatique globale (IPCC, 2022). De fait, la littérature sur l'adaptation au changement climatique avance une série d'arguments soulignant l'importance des actions collectives à l'échelle locale et des démarches participatives (McNamara et Buggy, 2017), rejoignant les résultats de recherches réalisées dans les vignobles à travers le projet Laccave.

L'échelle locale, au cœur de l'adaptation des vignobles

Six arguments peuvent être retenus pour justifier l'importance de l'action climatique à une échelle locale :

1. Tout d'abord, le changement climatique et l'exposition des activités humaines à ses risques varient dans l'espace. L'adaptation doit donc prendre en compte les expressions locales du climat qu'il faut anticiper, avec plus ou moins d'incertitude selon les méthodes retenues (Quenol, 2015). Ces démarches sont cruciales pour la viticulture, organisée en France selon des régions et terroirs où l'évolution climatique peut être très contrastée (Le Roux et al., 2017 ; Ollat et al., 2022), même au sein d'un bassin de production ;

2. L'impact du changement climatique dépend aussi de la résilience des systèmes écologiques et sociaux, liée à des facteurs locaux comme les spécialisations productives et les infrastructures, ou les institutions et savoirs (Füssel et Klein, 2006). Les caractéristiques locales de l'encépagement, l'existence d'un dispositif d'irrigation ou de conseil, les pratiques et connaissances locales des viticulteurs face aux risques climatiques peuvent ainsi jouer sur la résilience des vignobles et leurs conditions d'adaptation (Barbeau *et al.*, 2015);
3. La mise en œuvre de nouvelles actions pour s'adapter va mobiliser des ressources dont la nature, la disponibilité et les combinaisons varient localement. Dans les territoires viticoles, cela peut concerner l'accès au foncier ou à l'eau, les caractéristiques des écosystèmes et paysages, les financements possibles, les compétences des viticulteurs et des autres acteurs locaux... Ces ressources sont souvent des biens publics locaux (Belletti *et al.*, 2017);
4. Malgré la globalisation, l'espace local reste un « espace vécu », un cadre sensible et social, auquel s'attachent de nombreux acteurs et dans lequel l'enjeu climatique peut prendre une expression concrète, collective, mobilisatrice (Devine-Wright et Quinn, 2020). Dans les territoires viticoles, la vigne et le vin ont souvent une place symbolique importante, au-delà d'externalités positives vers d'autres activités comme le tourisme (Bertrand *et al.*, 2020). Ils peuvent donc jouer un rôle important pour une mobilisation climatique locale;
5. Des cadres formels d'action collective existent déjà à l'échelle locale, à travers les villes ou collectivités locales, des associations ou organisations qui peuvent intégrer l'enjeu climatique, comme c'est le cas avec les PCAET (Plan climat-air-énergie territorial). Les syndicats d'appellation, les caves coopératives ou les groupes et associations engagés dans des projets locaux sont autant de collectifs déjà existants;
6. Enfin, au-delà des ressources et cadres d'action existants localement, les capacités d'adaptation reposent sur l'activation de réseaux qui peuvent connecter des communautés locales à des acteurs et ressources externes, liés à d'autres territoires ou à des échelles plus globales (Klenk, 2017). Cette dimension relationnelle d'un territoire est reconnue comme une condition majeure de l'innovation (Pecqueur et Zimmerman, 2004), y compris pour la viticulture (Chiffolleau et Touzard, 2014). Ce levier doit donc aussi pouvoir être mobilisé pour l'adaptation au changement climatique (Moloney *et al.*, 2018).

La participation, enjeu pour l'adaptation dans les vignobles

L'urgence climatique incite aussi au développement de démarches participatives, avec différents degrés d'ouverture et d'implication des acteurs, depuis la consultation ou la concertation, jusqu'à la codécision (Hassenforder *et al.*, 2021). Ces démarches sont déjà engagées dans les vignobles (encadré II-5-1). Six arguments peuvent aussi être retenus :

1. L'engagement d'actions collectives pour l'atténuation et l'adaptation suppose une prise de conscience et un partage des enjeux climatiques, la construction d'une vision et de récits communs, qui peuvent être favorisés par des démarches participatives et leur médiatisation (IPCC, 2022);
2. Le contexte d'urgence, de complexité et d'incertitude qui entoure l'enjeu climatique pousse aussi à la collecte d'informations nouvelles, dans différents domaines.

- Impliquer des acteurs économiques, des usagers ou des citoyens peut favoriser une collecte de données sur l'impact du changement climatique ou l'expérimentation de solutions, participant au développement des sciences participatives ;
3. La nécessité d'explorer des stratégies nouvelles et plus radicales appelle à développer une créativité qui peut être favorisée par les interactions entre acteurs, croisant des regards contrastés (Moser et Ekstrom, 2010) ;
 4. Les ressources à mobiliser pour l'action climatique sont souvent des biens publics dont l'usage et la gouvernance reposent sur des négociations et compromis sociaux. La concertation avec les acteurs concernés par ces ressources est une condition d'efficacité et d'acceptation des options d'adaptation (IPCC, 2022) ;
 5. La construction de réseaux coopératifs entre acteurs de différents secteurs et territoires, et donc de leurs capacités d'adaptation, peut être favorisée par des démarches ou événements participatifs (Lee et al., 2018) ;
 6. Enfin, au-delà de justifications en termes d'efficacité pour l'action climatique, des arguments éthiques ou politiques mettent en avant la participation comme nécessaire pour accompagner les transformations sociales et l'adaptation au changement climatique (Ross et al., 2021). Cette exigence démocratique fait écho en France au fonctionnement d'institutions viticoles, comme les appellations d'origine contrôlée qui reposent sur des délibérations depuis l'échelle locale d'un syndicat jusqu'à l'Inao.

Les travaux de Laccave incarnent les arguments 1 (Ollat et al., 2022), 2 (García de Cortázar-Atauri et al., 2017), 4 (encadré II-5-2) et 5 (Boyer et Touzard, 2021).

Le climathon, une méthode pour favoriser l'émergence de solutions et l'implication d'acteurs locaux

Si l'urgence climatique suscite le développement de démarches à la fois locales et participatives, peu de travaux développent les méthodes qui peuvent être mises en œuvre, en particulier en milieu rural et agricole. Il existe bien une littérature sur les méthodes d'accompagnement de l'innovation à l'échelle des territoires. Celle-ci se renouvelle en intégrant les démarches participatives autour du soutien à « l'innovation ouverte », aux « écosystèmes d'innovation » ou *living labs* (Compagnucci et al., 2021). Mais l'enjeu climatique y est encore peu intégré. Les travaux sur les méthodes d'accompagnement local de l'innovation ou du changement dans l'agriculture sont également nombreux (Faure et al., 2018), mais plutôt orientés sur la transition agroécologique (Bergez et al., 2019; Toffolini et al., 2021). Il existe par ailleurs une littérature sur le rôle des villes dans l'action climatique (Hölscher et Frantzeskaki, 2021), mais les initiatives citoyennes y sont encore peu étudiées. Le besoin est donc réel de fournir des références et des analyses sur les méthodes participatives pour accompagner l'action climatique locale, depuis l'émergence de solutions, jusqu'à leur mise en œuvre et leur évaluation.

Le principe du climathon reprend les principes des hackathons mis au point par des développeurs informatiques : pour résoudre un problème, l'idée est de rassembler durant 24 heures des personnes concernées, dans une ambiance conviviale et ludique, pour stimuler l'intelligence collective et déboucher sur des solutions. Le climathon est donc un « hackathon climatique », avec trois objectifs : sensibiliser les acteurs locaux à l'enjeu climatique, renforcer les « écosystèmes locaux d'innovation », inspirer des (suite p. 202)

Encadré II-5-2. Adaptation au changement climatique et gestion de l'eau à l'échelle territoriale : la démarche Talanoa-Water

Un des leviers de l'adaptation de la viticulture au changement climatique est l'irrigation. Si elle ne réduit pas tous les risques liés aux changements climatiques, elle permet de limiter ou gérer les effets du stress hydrique. Mais l'adoption de l'irrigation a des implications sur le territoire, car l'eau y est mobile, sa disponibilité se réduit avec le changement climatique et elle est une ressource utilisée par un ensemble d'usagers. Cette adaptation ne peut donc pas être raisonnée seulement au sein de la filière viticole ou agricole. La gestion de l'eau à l'échelle territoriale est un des enjeux majeurs de l'adaptation de la société au changement climatique et l'agriculture est fortement concernée, car elle est souvent un des usagers majoritaires (chapitre I-7).

Dans ce contexte, les collectivités et acteurs socioéconomiques d'un territoire cherchent à construire et à analyser des stratégies de développement et de l'usage de l'eau, selon différents scénarios exogènes (notamment climatiques) et en cohérence avec la réglementation sur l'eau traduite localement par un PGRE (Plan de gestion de la ressource en eau), piloté par un Établissement public territorial de bassin (EPTB).

La démarche proposée par le projet Talanoa-Water est d'identifier et d'évaluer des stratégies d'adaptation transformatives et robustes, face à la rareté de l'eau en contexte de changement climatique, et d'en accélérer l'adoption tout en contribuant aux objectifs de gestion intégrée des ressources en eau (équité sociale, efficacité économique et durabilité environnementale). Pour cela, le projet propose de développer un « écosystème d'innovation » à partir d'une méthode inclusive et transparente d'engagement des parties prenantes et en mobilisant une modélisation hydroagroéconomique qui inclut le recours à un jeu sérieux pour explorer différentes stratégies d'adaptation. Cette approche est développée dans six bassins versants méditerranéens « laboratoires pilotes de l'eau »*.

Le « laboratoire pilote » français est le bassin versant de l'Aude aval et médiane, où s'est développée une viticulture irriguée, et qui est soumis à un fort déséquilibre entre volumes prélevables (règlementation eau) et demande en eau. En 2023 (à mi-projet), plus de 50 acteurs de l'agriculture et de la gestion de l'eau ont participé à trois ateliers pour échanger sur l'état des lieux, construire des scénarios prospectifs de développement viticole/agricole et identifier des mesures appartenant à quatre grands types :

- mobilisation de la ressource en eau ;
- optimisation des technologies et réseaux ;
- agroécologie et pratiques agricoles ;
- instruments règlementaires et incitatifs, et gouvernance.

Une première version d'un jeu sérieux a permis de faire échanger les acteurs autour des objectifs et mesures à articuler entre elles et pour trois horizons distincts : 2025, 2035 et 2050. Les stratégies vont ensuite être évaluées en 2024 avec les modèles hydroagroéconomiques et les parties prenantes, puis nourrir les plans d'action des collectivités locales et du PGRE.

* Italie, Égypte, France, Liban, Espagne et Tunisie.

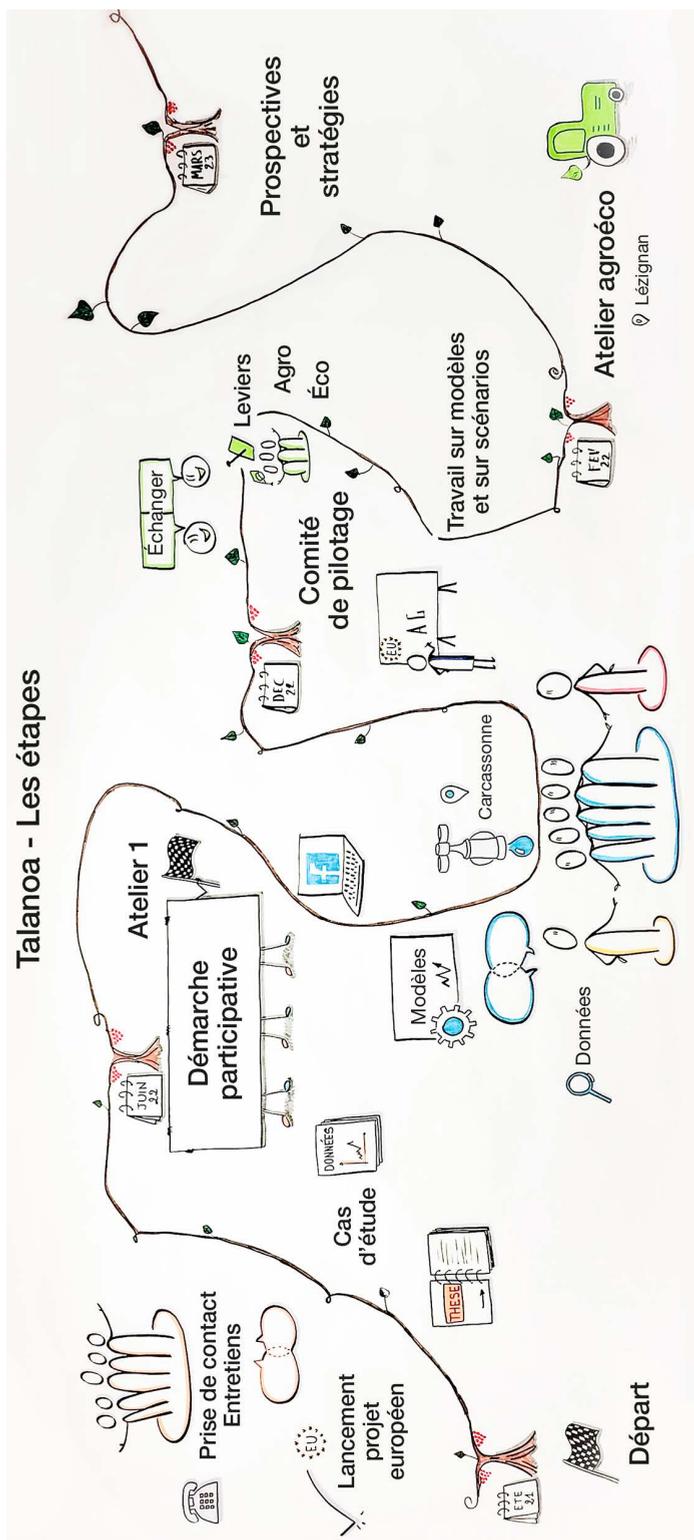


Figure II-5-1. Frise chronologique des différentes grandes étapes du projet Talanoo-Water à la mi-2023.
© Sophie Banette, Isabelle Majorel, SI Facilitation, Montpellier.

projets et des actions en faveur du climat (Climate-KIC, 2022). La Climate-KIC invite les villes à s'engager dans cet évènement annuel, en suivant une même démarche :

- la ville candidate trouve un « groupe organisateur » et formule une question concrète visant à résoudre un problème lié au changement climatique. Par exemple, « comment réorganiser les mobilités pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ? ». La question doit être argumentée au regard de l'enjeu local du changement climatique ;
- le groupe organisateur construit un programme pour 24 heures reprenant les étapes d'un hackathon : se connaître ; prendre connaissance du problème et de ses implications ; explorer l'éventail des solutions ; choisir des projets porteurs de solutions ; constituer des équipes pour développer ces projets en les confrontant aux participants et à des utilisateurs ; organiser des moments de détente et de convivialité ; présenter chaque projet devant un jury et remettre un prix ;
- les organisateurs précisent ensuite les méthodes d'animation pour chaque étape, préparent les conditions matérielles (salles, repas, matériel pédagogique...) et assurent la communication pour mobiliser les acteurs locaux ;
- pendant les 24 heures du climathon, la mise en œuvre du programme se fait dans une ambiance conviviale, en respectant un équilibre entre moments de rassemblement et travaux en équipe sur chaque projet. Les animateurs veillent à la construction de solutions réalistes, à l'implication d'une diversité de participants dans les équipes, au maintien d'un noyau de participants sur les 24 heures et à la capitalisation des travaux via des photos et des prises de notes ;
- après le climathon, les organisateurs s'engagent à porter un maximum d'idées jusqu'à leur réalisation, à communiquer sur l'évènement et à en faire un bilan.

Développement d'une méthode « climathon » pour des communes agricoles

Pour adapter la méthode climathon à des communes agricoles, nous nous sommes appuyés sur les principes et consignes de la Climate-KIC et sur des expériences participatives précédentes (par ex. projet Laccave). Nous avons expérimenté cette méthode dans trois communes viticoles de l'Hérault, en 2018, 2020 et 2021. Au-delà d'un cadre méthodologique initial, la Climate-KIC a aussi fourni un cofinancement⁴³ pour ces évènements et permis de renforcer leur communication (plateforme Web), inscrivant l'évènement dans un réseau international de villes.

Les trois communes viticoles

Passer d'une grande ville à une commune viticole a des implications pour un évènement participatif. L'espace naturel, agricole et viticole prend une place centrale, ce qui modifie les questions, les types d'acteurs, les cadres et objets d'action. Une activité économique — dominante pour le territoire — est ciblée, la viticulture, ce qui amène à

43. À travers le projet AWICC et MEDCLIV visant à renforcer les écosystèmes d'innovation pour l'adaptation de la viticulture, financé par l'Institut européen d'innovation et de technologie Climate-KIC (Knowledge and Innovation Community), porté par INRAE (France) et l'Institut de biométéorologie (Ibimet) italien.

revoir les acteurs concernés, en cherchant à dépasser son cercle professionnel. La taille modeste des communes limite les ressources financières pour l'évènement et surtout le nombre et la composition des participants potentiellement concernés. Nous avons pour cela considéré que si l'enjeu était bien le vignoble de chaque commune, l'espace social concerné était plus étendu, incluant par exemple des acteurs de communes voisines ou des chercheurs et étudiants de Montpellier (la préfecture du département).

Les trois communes retenues sont situées dans le département de l'Hérault, au cœur de la région viticole du Languedoc, restructurée par les domaines et caves coopératives depuis les années 1980. La production dominante de vin de table a laissé la place à des vins de qualité en appellation d'origine protégée (AOP) sur les coteaux, ou à des vins de cépage en indication géographique protégée (IGP) en plaine. Nous avons choisi des communes où les vignes sont plantées en coteaux, qui produisent majoritairement des vins AOP (tableau II-5-1). Dans les trois communes, le changement climatique était source de préoccupation pour les acteurs initialement rencontrés (représentant du secteur du vin et maire). Ces communes diffèrent par leur distance à Montpellier (de 15 à 55km), avec des effets potentiels sur la densité de population et la composition socioprofessionnelle des habitants, et par l'importance des coopératives. À Murviel, proche de Montpellier, la coopérative est désaffectée et la viticulture s'organise autour de domaines en agriculture biologique ; à Montpeyroux et Cabrières, les coopératives sont dominantes et dynamiques, produisant des vins de terroir, AOP Montpeyroux ou AOP rosé de Cabrières.

Tableau II-5-1. Caractéristiques des communes du climathon. SAU : surface agricole utile; ETP : équivalent temps plein. Source : Insee, Recensement général agricole et communes.

	Commune	Viticulture	Production de vins	Géographie
	Surface Population Distance à Montpellier	Surface de vigne Part de la SAU Actifs viticoles Part d'actifs	Domaines Coopératives Part en AOP, part en bio	Altitude Pluviométrie moyenne Topographie
Murviel-les-Montpellier	1 010 ha 1 900 habitants 750 actifs avec emploi 16 km de Montpellier	140 ha 76 % SAU 27 ETP viticoles 4 % des actifs	8 domaines (85 % vol.) 12 coopérateurs (15%) Coopératives extérieures 70 % AOP, 75 % bio	150 m (66-236) 800 mm, en baisse Petites parcelles en coteaux
Montpeyroux	2 242 ha 1 370 habitants 550 actifs avec emploi 35 km de Montpellier	620 ha 70 % SAU 85 ETP viticoles 15 % des actifs	15 domaines (25 % vol.) 110 coopérateurs (75%) Coopérative Castelbarry 60 % AOP, 20 % bio	130 m (66-648) 900 mm, en baisse Coteaux, terrasse et fonds de vallée
Cabrières	2 900 ha 550 habitants 200 actifs avec emploi 55 km de Montpellier	340 ha 94 % SAU 45 ETP viticoles 23 % des actifs	3 domaines (15 % vol.) 56 coopérateurs (85%) Coopérative Estabel 90 % AOP, 30 % bio	135 m (76-481) 700 mm, en baisse Coteaux et fond de vallée

Le choix des organisateurs et participants

Pour rester dans le concept du climathon, l'organisation hôte est la municipalité, associée à une organisation viticole (syndicat d'appellation ou coopérative). Dans les cas présentés ici, l'initiative est partie de l'institution scientifique (INRAE) qui coordonne les sessions de préparation, l'évènement, puis son compte-rendu, mais celle-ci reste peu visible et n'est pas forcément indispensable. Les communes concernées sont celles où la municipalité et les organisations viticoles se sont montrées intéressées, et elles ont joué un rôle clé dans la conception du défi, la mobilisation d'acteurs, la gestion logistique de l'évènement et sa valorisation ultérieure.

L'évènement s'adresse en priorité aux viticulteurs et citoyens de la commune, mais il est ouvert à tous. Le « recrutement » des participants se fait sur la base du volontariat, à partir d'une inscription préalable, ce qui permet de relancer des invitations pour s'assurer de la présence d'une diversité d'acteurs : plusieurs types de viticulteurs, des représentants d'associations locales, des élus, d'autres acteurs de la filière Vigne et vin ou d'autres secteurs, des étudiants, des chercheurs.

Les viticulteurs sont au premier plan comme acteurs partageant des connaissances et pouvant mettre en œuvre les solutions, mais aussi comme accompagnateurs des participants pour faire découvrir leurs exploitations dans une séquence du climathon. Une autre spécificité de notre adaptation du climathon est l'intégration d'experts. Leurs apports peuvent concerner le changement climatique, la viticulture, la gestion de l'eau, les circuits de commercialisation ou la communication... Ils sont invités à faire des présentations courtes au début du climathon, puis à accompagner, à la demande, les équipes dans l'élaboration de leur projet.

Le déroulement et l'animation du climathon viticole

Dans sa forme initiale, le climathon s'organise sur 24 heures, sans pause nocturne, en suivant les règles des hackathons. Mais ce qui est possible avec de jeunes informaticiens est difficilement accepté par la diversité d'acteurs visée ici, incluant des personnes de métiers différents, de tout âge, avec ou sans enfants à garder le soir... Nous avons donc modifié le déroulement de l'évènement en le faisant débiter le vendredi en fin d'après-midi, suivi d'une pause vers 23 heures, puis une reprise le samedi matin, pour finir en fin d'après-midi.

Les climathons viticoles s'organisent en cinq séquences, avec des objectifs, méthodes et résultats spécifiques (fig. II-5-1). Elles sont entrecoupées de moments de convivialité (exercice brise-glace, dégustation de vin, repas, animation musicale, remise de prix...) et mobilisent une variété de situations d'interaction : présentations plénières, discussions bilatérales ou par table, travail d'équipe, réalisation d'une fresque, mises en commun, moments fusionnels, visites de terrain, présentations face à un jury. Ces séquences se déroulent comme suit :

1. La première séquence vise un **partage de connaissances** sur la question retenue, le programme du climathon, le changement climatique et l'évolution du vignoble local. Il s'agit de présentations plénières par les organisateurs, suivies de réactions libres ;
2. La deuxième séquence **explore les problèmes et les solutions**, en ouvrant et croisant les perspectives. Elle s'organise autour d'un *World Café*⁴⁴ et s'articule en

44. Le *World Café* est un format d'animation d'intelligence collective. Une personne (parmi l'organisation, idéalement) doit rester présente à chaque table pendant toute la durée du *World Café* et les participants changent de table à chaque session.

Tableau II-5-2. Principales étapes, méthodes et résultats proposés pour les climathons viticoles. * Non réalisé dans tous.

Objectif	Étapes				
	1. Accueil - partage d'un état des lieux	2. Exploration des problèmes et solutions	3. Développement des projets	4. Maturation des projets et échanges avec experts / visites	5. Présentations pitches Fin
Méthode	Présentations «Changement climatique et impact sur la vigne et le vin » Témoignages sur les pratiques d'adaptation	World café Vote Choix du projet sur lequel chacun s'investit	Guide de questions et d'items pour spécifier les projets Restitutions courtes	Travail en équipe Visites de terrains et de caves Partage des impressions suite aux visites	(Format libre) Présentations des projets Jury*
Activités sociales	Brise-glace	Dégustation de vin et dîner	Documents et cartes disponibles pendant l'atelier	Repas, musique	Remerciements et cadeaux
Produits	Présentations d'experts et notes	Notes des World Café - « grappe des solutions »	Photos et notes des visites Description de projet V0	Description de projet V1	Présentations (différents supports) Évaluation-rapport

trois sessions de 20 minutes chacune. Les participants vont identifier le maximum de problèmes que recouvre le défi du climathon, puis choisir des problèmes particuliers et en approfondir les tenants et aboutissants, et enfin, proposer des solutions pour traiter les problèmes choisis. Chaque table choisit dès la deuxième session des voies différentes. Les résultats sont organisés sur une fresque originale, le « cep des solutions », qui organise les idées de solutions travaillées ;

3. La troisième séquence vise à **resserrer les contributions sur des projets** porteurs de solutions. Ils sont choisis à partir d'un vote sur les solutions (2 votes par personne), puis soutenus par des groupes qui démarrent un travail de structuration avec l'aide possible d'experts. Les préprojets font l'objet d'une mise en commun en fin de soirée ;
4. Une quatrième séquence **confronte les porteurs de projet avec les conditions de mise en œuvre** sur le terrain. Elle s'organise à travers des visites de terrain, chez des viticulteurs ou dans des caves, en associant les membres des différents groupes projet. Elle se termine par une mise en commun des enseignements des visites (et un repas convivial) ;
5. La dernière séquence vise à **préciser chaque projet puis à le présenter** devant un jury. Chaque groupe développe son projet (incluant un plan d'action et une esquisse des moyens nécessaires), construit sa présentation sous forme de *pitch* (présentation, sketch, vidéo...) et l'expose devant les participants et un jury qui attribue des prix.

Par rapport à la proposition initiale du climathon, il n'y a pas d'équipe gagnante dont le projet serait sélectionné. L'objectif est d'initier une variété de projets ou d'initiatives non exclusifs et les prix (corbeilles de produits gastronomiques et vins locaux) peuvent être partagés entre les équipes.

Encadré II-5-3. Des questionnements sur l'adaptation au changement climatique jusqu'à sa raison d'être : le cas Ventoux

Dès la fin 2017, une réflexion importante a émergé dans la région de la vallée du Ventoux, et particulièrement au sein de son vignoble, concernant les conséquences d'un changement climatique de plus en plus perceptible dans le territoire. Ces réflexions et questions ont poussé l'ODG Ventoux à solliciter INRAE (AgroClim) pour l'accompagner dans ses réflexions. Un premier travail a permis de caractériser les évolutions du climat passé, présent et futur. Ces résultats ont montré des changements récents, avec une avancée significative de la phénologie et une forte augmentation de la température pendant la période de maturité. Ces tendances vont s'accroître dans les années à venir, avec plus ou moins d'intensité selon les scénarios d'émissions (Marjou et García de Cortázar-Atauri, 2019). De nouvelles questions ont aussi émergé autour de l'organisation spatiale du vignoble et des nouvelles zones, qui pourraient devenir favorables à la production viticole dans les années à venir. Une deuxième analyse à une échelle plus fine a permis d'explorer la structure spatiale des potentiels impacts (notamment du gel et des canicules), en particulier dans des zones d'expansion potentielle du vignoble (Huard, 2021). Toutes ces informations ont permis à l'ODG de se doter d'une base de connaissances, rendant possible une projection dans différents scénarios d'évolution et d'adaptation de son vignoble.





En parallèle à ces travaux, une dynamique importante s'est construite au sein du territoire pour comprendre comment l'agriculture du Ventoux pourrait s'adapter aux conditions climatiques futures. Des actions collectives (ODG Ventoux, chambre d'Agriculture, Parc naturel régional Ventoux, Communauté d'agglomération Ventoux Comtat [COVE], Lycée agricole, INRAE) ont été coconstruites (Forum ouvert, *World Café*) et ont permis de faire émerger d'autres questionnements autour de l'atténuation, la diversification culturale, la gestion de l'eau ou le développement de l'agroforesterie. Plusieurs projets collectifs ont été mis en place afin de répondre à ces questionnements. De son côté, l'ODG Ventoux a décidé d'inscrire dans la durée ses réflexions autour de l'adaptation du vignoble au changement climatique. Pour cela, elle a décrit sa propre « Raison d'être », qui définit le projet de long terme dans lequel s'inscrit l'objet social de l'ODG. Trois objectifs ont été retenus à l'horizon 2030 :

- protéger et développer les forêts;
- réduire son impact et s'adapter au changement climatique;
- partager et cultiver la vie locale.

Ce travail doit permettre à l'ODG Ventoux de construire une stratégie d'adaptation aux différents enjeux locaux et globaux, en collaboration avec ses partenaires territoriaux.

Résultats des climathons viticoles

Les résultats des trois climathons peuvent être présentés ensemble, offrant une première comparaison factuelle. Ces résultats concernent la formulation des questions initiales, la composition des participants, les propositions d'action puis les projets sélectionnés et développés, ainsi qu'une première évaluation d'impact.

Questions initiales et enjeux climatiques locaux

Sans surprise, les questions formulées par les comités d'organisation des trois climathons sont très proches :

- « Comment Murviel peut-il maintenir son vignoble et ses vigneron face au changement climatique, grâce à ses ressources locales ? »
- « Comment pérenniser les vignobles et les vigneron de Montpeyroux face aux évolutions climatiques et sociétales ? »
- « Comment les femmes et les hommes de Cabrières s'organisent pour préserver le patrimoine viticole et le paysage face aux dérèglements climatiques ? »

Ces questions expriment une attitude défensive (« maintenir », « pérenniser », « préserver ») face au changement climatique, vu comme une menace, avec une volonté d'inclusion de tous les acteurs viticoles. Des nuances sont perceptibles avec l'indication d'autres enjeux à Montpeyroux (« attentes sociétales ») ou du paysage à Cabrières, commune très engagée dans l'œnotourisme.

Les présentations introductives, les réactions et la première séquence du *World Café* sur les problèmes ont confirmé que la perception des impacts du changement climatique est similaire dans les trois communes : avancée des dates de vendange, baisse des rendements associée à des déficits hydriques croissants, augmentation du degré d'alcool des vins, risques accrus liés à des vagues de chaleur, des pluies violentes ou des incendies.

Des dimensions sont perçues avec plus d'intensité selon chaque commune : la sécheresse à Murviel, les risques climatiques à Montpeyroux, la valorisation des vins à Cabrières. Ces différences peuvent s'expliquer par les contextes annuels différents (vague de chaleur en 2019, marché du vin plus difficile en 2021).

Les participants

La composition des participants est en soi un résultat de l'évènement (tableau II-5-3). Le nombre est important à Murviel (60), plus réduit à Montpeyroux (38) et Cabrières (31). Leur diversité a toutefois été maintenue avec, à chaque fois, une quinzaine de viticulteurs, dont des responsables de coopérative ou de syndicat AOP, la présence du maire et d'élus, de représentants d'autres catégories d'acteurs, même si ceux de l'aval du secteur (négoce, œnologie...) — souvent non présents dans la même commune — étaient moins représentés. La forte participation d'acteurs non viticoles à Murviel (57 %) reflète la structure sociale d'une commune périurbaine et sa proximité d'une grande ville d'où sont venus plus facilement des participants comme des étudiants. Les participants n'ont pas tous assisté en continu à l'évènement en fonction de leurs obligations familiales ou professionnelles.

Tableau II-5-3. Caractéristiques socioprofessionnelles des participants aux climathons viticoles.

Participants par commune	Murviel	Montpeyroux	Cabrières
Total participants	60	38	31
Viticulteurs, dont :	14	15	14
domaines	10	7	3
coopérateurs	4	8	11
Organisations viticoles	8	3	3
Négoce, œnologues	4	1	1
Chercheurs	10	8	4
Étudiants	8	3	1
Élus	3 (dont maire)	3 (dont 2 maires)	5 (maire, député...)
Autres acteurs, association locale	13 (6 associations)	6 (2 associations)	5 (2 associations)

L'éventail des propositions d'actions

L'exploration des solutions lors des séances *World Café* a fourni au total 85 propositions d'action, 34 à Murviel, 24 à Montpeyroux et 27 à Cabrières. Ces propositions ont été à chaque fois positionnées autour d'un dessin de cep de vigne, selon leurs proximités thématiques, pouvant être regroupées par « grappes de solutions » qui correspondent à différents domaines d'action (tableau II-5-4). Au total, dix domaines peuvent être retenus, la majorité d'entre eux ayant été mis en avant dans les trois communes, comme la gestion de l'eau, l'expérimentation de nouveaux cépages, les pratiques agroécologiques (sol, enherbement...) ou la communication et valorisation des vins. Des domaines sont parfois absents, comme le changement de cahiers des charges à Murviel

ou les actions d'atténuation à Montpeyroux et Cabrières. D'autres sont spécifiques à une commune, comme la compensation carbone à Murviel, l'œnologie à Montpeyroux ou l'action politique à Cabrières. Ces différences peuvent être liées à l'orientation du vignoble (importance du bio et préoccupations liées aux sols à Murviel), mais peuvent aussi résulter de la composition des participants et du rôle qu'ont joué certaines personnes (porteuses d'idées, motivées...) ou certaines séquences d'interactions (extension d'une discussion sur un thème particulier).

Tableau II-5-4. Nombre de solutions par domaine d'action et votes des participants.

Domaine d'action	Murviel		Montpeyroux		Cabrières	
	Nombre d'actions par domaine et part dans les votes (%)		Nombre d'actions par domaine et part dans les votes (%)		Nombre de votes et vote collectif (++)	
Connaissance et gestion de l'eau	5	24	3	19	4	++
Valorisation et communication	4	6	3	4	3	++
Atténuation, compensation des GES	10	19	1	5	1	
Développement de l'agroécologie	5	17	5	8	2	
Expérimentation de nouveaux cépages	3	17	2	28	5	
Pratiques œnologiques	0	0	3	4	1	
Introduction d'animaux	2	10	2	13	2	++
Diversification	2	3	2	15	1	
Changement du cahier des charges	0	0	1	5	2	
Action politique, animation locale	2	8	2	0	6	
Total	34	100	24	100	27	non significatif

Les projets sélectionnés et développés par les équipes

La sélection des projets s'est faite à partir d'un vote sur les grappes de solutions, de manière individuelle d'abord à Murviel et à Montpeyroux, avant décompte, et de manière collective à Cabrières (tableau II-5-4). Ces votes précisent l'importance accordée à une thématique, au-delà du nombre de propositions initiales. Ce point de départ pour les projets dépend aussi de la constitution de groupes qui veulent ou non porter une thématique. Ainsi, à Montpeyroux, la thématique de l'irrigation, pourtant plébiscitée par les votes individuels, n'a pas dépassé le stade du préprojet par manque de volontaires motivés pour le développer. Une raison pouvait être que la technicité de la solution et son ampleur dépassaient l'ambition des projets développés ou que ce projet était déjà travaillé dans d'autres arènes. Au total, 13 projets ont été initiés, 6 à Murviel,

4 à Montpeyroux (dont un non abouti) et 3 à Cabrières (tableau II-5-5). Les projets ont suivi les séquences prévues, débouchant sur des présentations finales parfois originales (pièce de théâtre, vidéo...) et sur des notes détaillées, reprises dans les rapports de synthèse produits à l'issue du climathon et rendus publics (Nougier et Touzard, 2018; Nougier et al., 2020; Graveline et al., 2022).

Des projets sont communs à deux ou trois communes :

- l'accès à l'eau, avec surtout des enjeux de connaissance des ressources disponibles et des approches globales à l'échelle du territoire, en explorant différentes combinaisons de solutions (réutilisation des eaux usées traitées, recherche ou réhabilitation de sources, retenues collinaires, gestion des sols et paysages, pratiques économes...);
- la réintroduction d'animaux (moutons, chèvres, chevaux) dans les territoires viticoles, associée à des services multiples (gestion de l'enherbement et des sols, lutte contre les incendies...), mais avec aussi une option originale sur Montpeyroux autour de la création d'une « écurie communale »;
- le partage de connaissances locales sur l'adaptation de cépages nouveaux ou anciens et sur leurs modes de conduite, à travers une parcelle communale (Murviel) ou un réseau d'observation (Montpeyroux).

Les autres projets sont spécifiques à chaque commune, même si leurs thèmes avaient été mentionnés dans les trois climathons lors de la phase exploratoire : Murviel propose ainsi le développement d'une coopérative d'utilisation de matériel agricole (Cuma) pour mutualiser les équipements et réduire l'impact carbone, la création d'une « Agora du vin » pour partager les enjeux climatiques avec la société, et un label local valorisant les actions de compensation des viticulteurs; Montpeyroux se distingue par un projet de diversification des cultures au sein des domaines viticoles (légumineuses, fruits, légumes, herbes aromatiques...) impliquant la structuration de nouvelles filières sur la coopérative; Cabrières propose un effort de communication autour de ses vins, avec un enjeu de collaboration entre la coopérative et un domaine prestigieux.

Retombées et première évaluation ex-post

Les réponses des participants aux questionnaires distribués à la fin de chaque climathon font état d'une satisfaction générale, soulignant l'acquisition d'informations nouvelles, les prises de contact avec de nouveaux acteurs, l'ouverture et la convivialité, ou encore la découverte de nouvelles méthodes d'animation. Les interrogations portent sur la poursuite des projets présentés, leur faisabilité ou le coût de l'évènement au regard de ses impacts possibles.

Les retours médiatiques sont nombreux, en particulier pour Murviel (*Midi-Libre*, *La Gazette de Montpellier*, *Paysan du Midi...*). Des présentations ont été faites dans les bulletins municipaux ou sur des réseaux sociaux, locaux et internationaux (en particulier ceux de la Climate-KIC, de Vineas (encadré II-5-5 ou de la FAO). Le climathon de Murviel a aussi été intégré dans un film documentaire sur l'adaptation des vignobles au changement climatique⁴⁵. Trois rapports ont été diffusés et repris par le Réseau d'étude du changement climatique en Occitanie (Graveline et Touzard, 2021).

45. *Vignes dans le rouge*, documentaire de Christophe Faugère, bande-annonce sur <https://www.imagotv.fr/documentaires/vignes-dans-le-rouge>.

Tableau II-5-5. Projets développés dans les climathons et élément d'évaluation ex-post en 2023.
NR : non renseigné, données absentes; GIEE : groupement d'intérêt économique et environnemental; Gemapi : gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations.

	Problèmes identifiés et retenus	Projets présentés Évaluation en juin 2023
Murviel (26-27/10/2018)	Stress hydrique et sécheresse affectant les rendements et la qualité du vin	1. Étude hydraulique et gestion intégrée de l'eau à Murviel <i>Étude en 2021, Reuse, projet living lab.</i>
	Gérer l'enherbement et renforcer la matière organique dans le sol	2. (Re)mettre l'animal dans les vignes <i>Réalisé et étendu, engagé avant 2018</i>
	Tester de nouveaux cépages, partager les observations	3. Parcelle expérimentale communale <i>Réalisé, patrimonial, plantation en 2022</i>
	Impact carbone élevé des ventes de bouteilles liées à l'œnotourisme	4. Certification et Label local « Ton climat » <i>Non réalisé, idée portée par la métropole</i>
	Coûts élevés de logistique (matériel, bouteille) avec impact carbone	5. Mutualisation de matériel pour réduire l'impact carbone (Cuma) <i>Tentative avortée</i>
	Partager les enjeux et connaissances du vin face au changement climatique	6. Agora citoyenne de Murviel <i>Projet sous d'autres formes (GIEE, tiers-lieu)</i>
Montpeyroux (6-7/03/2020)	Stress hydrique et sécheresse	1. Gestion intégrée de l'eau <i>Non finalisé, étude ultérieure</i>
	Maintenir les revenus, limiter les risques climatiques	2. Diversifier pour s'adapter <i>Idée reprise à l'échelle individuelle</i>
	Partager les informations sur les cépages et les pratiques	3. Expérimenter le vignoble du futur <i>Projet à l'échelle du syndicat AOC</i>
	Gérer l'enherbement en limitant l'impact carbone	4. Installer une écurie vigneronne <i>Non réalisé</i>
Cabrières (15-16/10/2021)	Trop faible valorisation des vins	1. Outils collectifs de communication et valorisation (vidéo, film, série...) <i>NR (envisagé par l'Intercommunalité)</i>
	Stress hydrique et sécheresse, pas d'accès à l'eau	Caractérisation des ressources en eau de la commune... <i>NR (envisagé avec l'Institut Agro)</i>
	Risque d'incendie et dégradation des sols et paysages, risques d'inondation par manque d'entretien de la rivière Boyne	Installation d'un éleveur pour favoriser les désherbage, fertilisation, curage de fossés et pour lutter contre les incendies... <i>NR (envisagé dans un cadre Gemapi)</i>

Le suivi réalisé par entretiens en 2022 et 2023 auprès des communes donne une première idée des impacts, avec des effets contrastés entre Murviel d'un côté, et Montpeyroux et Cabrières de l'autre :

- à Murviel, l'antériorité et l'importance de l'évènement (nombre de participants, médiatisation forte) se traduisent par une dynamique notable. Un GIEE « Sols et adaptation au changement climatique » a été créé, animé par la chambre d'Agriculture et étendu aux autres communes de l'ouest de Montpellier. Un éleveur de chèvres, en cours d'installation au moment du climathon, pratique maintenant l'écopâturage dans les vignes. Une étude a été réalisée en 2021 sur l'histoire

Encadré II-5-4. Climenvi, intégrer le changement climatique dans les décisions des chefs d'entreprises viticoles du Centre-Val de Loire

Le Partenariat européen pour l'innovation Climenvi (2018-2023) a eu pour objectif de développer des outils de formation et de conseil afin d'accompagner les viticulteurs dans l'appropriation de la connaissance des impacts du changement climatique en région Centre-Val de Loire. Climenvi s'est appuyé sur trois entreprises pilotes ayant des caractéristiques technicoéconomiques représentatives du territoire et situées dans trois zones d'appellation (Chinon, Touraine et Sancerre).

Sur la base de l'étude de l'évolution des variables agrométéorologiques, des contextes socioéconomiques et des trajectoires d'adaptation des trois sites pilotes, trois outils ont été développés :

- un module de formation ;
- un outil d'aide à la décision, Climenvi-App ;
- une plaquette de communication (en libre accès, cf. chambre d'Agriculture 41).

Les trajectoires d'adaptation réalistes coconstruites avec les viticulteurs ont considéré trois horizons temporels : le court terme (l'année en cours), le moyen terme (2030) et le long terme (2050). Elles combinent quatre axes d'adaptation : terroir et matériel végétal, viticulture, vendanges et vinification, organisation du travail.

L'analyse du court terme a montré qu'un nombre important d'actions est déjà mis en œuvre pour répondre à la variabilité climatique. Il n'a été fait état d'aucun sentiment de panique ou d'urgence : « nous avons déjà vécu des bouleversements par le passé », martèlent les viticulteurs, confiants mais actifs dans la recherche de solutions. Si le besoin d'équipement n'est pas ressorti comme le premier frein à l'adaptation, les enjeux d'écologisation des pratiques, associés à un besoin accru de main-d'œuvre sur certaines périodes sont au cœur des difficultés socioéconomiques des entreprises. Par ailleurs, pour l'instant, le réchauffement climatique a induit une augmentation de la fréquence de bons millésimes, notamment pour les rouges. Les principaux leviers d'adaptation techniques sont de se protéger efficacement du gel printanier et de se doter de capacités de froid suffisantes pour la période de vendange. Par contre, l'accès aux connaissances sur les évolutions climatiques afin d'anticiper les réorganisations à opérer représente toujours un frein. Il existe notamment des attentes fortes sur la capacité à prévenir des aléas climatiques extrêmes. Enfin, l'acceptabilité des consommateurs de l'évolution de la typicité des vins reste une incertitude. Un réel besoin d'accompagnement a été largement exprimé.

Climenvi par les vignerons : <https://centre-valdeloire.chambres-agriculture.fr/ird/ird-projets-rd-innovation/projet-pe-climenvi-2018-2022>.

de la gestion de l'eau dans la commune, qui s'est portée ensuite candidate pour un projet de *living lab* sur la circularité de l'eau. Une parcelle communale a été plantée en 2022 avec d'anciens cépages, pour un objectif patrimonial et expérimental. Un projet de tiers-lieu, incluant des viticulteurs, est en cours pour réhabiliter le bâtiment de l'ancienne cave coopérative ;

- à Montpeyroux et Cabrières, les projets, plus récents et davantage marqués par la période Covid, ne se sont pas encore traduits par des réalisations concrètes à l'échelle locale. Des actions ont toutefois été initiées à l'échelle individuelle (diversification de cultures) ou intercommunale (nouveaux événements autour du vin et du climat). De l'avis des présidents des deux coopératives, le climathon a contribué à impliquer les acteurs dans d'autres projets et à «faire avancer les idées». Ces exemples illustrent la nécessité d'inscrire des événements ponctuels comme le climathon dans une dynamique de plus long terme portée par les acteurs locaux et concrétisée par différents moments ou processus.

Conclusion

L'expérience des climathons viticoles montre qu'il est possible de mobiliser sur 24 heures des acteurs locaux pour faire émerger des projets d'action climatique locale et — on peut supposer — favoriser la prise de conscience et l'action climatique dans un vignoble.

Intérêts et limites des climathons viticoles

La satisfaction des participants, l'exploration de solutions, une première ébauche de projets, la communication autour de l'évènement, mais aussi des impacts en termes de nouvelles collaborations ou de nouveaux projets témoignent du succès de la démarche en tant que telle, sans préjuger de ses effets.

Au-delà d'un évènement convivial pouvant apporter des bénéfices à ses participants, l'intérêt des climathons viticoles peut être souligné à trois niveaux :

- la mise en relation d'acteurs de différentes catégories socioprofessionnelles est une situation nouvelle dans les vignobles, dépassant les rencontres habituelles entre viticulteurs ou entre ceux-ci et les consommateurs de vin. Cette «ouverture pour agir» est un apport des climathons, favorisant l'éventail de solutions, mais surtout l'implication de viticulteurs dans des actions locales intégrant l'enjeu climatique. Les climathons viticoles s'inscrivent ainsi dans les démarches d'accompagnement d'innovations ouvertes pour le développement agricole (Faure *et al.*, 2018) ou pour les territoires en transition (CLER, 2021) ;
- l'évènement doit être analysé au regard des processus et projets que portent les acteurs du territoire. Il permet avant tout de révéler, d'accélérer ou de faciliter des initiatives déjà envisagées ou portées par certains acteurs, comme le montre l'exemple de Murviel. Notre analyse confirme que les climathons donnent avant tout une visibilité et un soutien à des actions déjà engagées, en milieu urbain ou rural (Ross, 2021 ; Simons *et al.*, 2022) ;
- l'intérêt des climathons doit aussi se mesurer au-delà des impacts locaux. La communication sur l'évènement, les publications ou le partage des expériences

dans les réseaux viticoles, politiques, scientifiques et associatifs contribuent à l'extension de l'action climatique dans les vignobles français, et plus globalement au processus *bottom up*, c'est-à-dire qui part de la base appelée par le Giec (IPCC, 2022).

Les limites ou difficultés des climathons viticoles doivent aussi être soulignées :

- ceux-ci restent des événements ponctuels dont les effets ne sont pas assurés *a priori*, et qui sont difficilement évaluables;
- si la recherche d'une diversité d'acteurs est cruciale, elle dépend d'intérêts, de motivations ou de disponibilités très variables selon les communes;
- le temps et les connaissances disponibles limitent le développement des projets présentés, donnant parfois plus de poids à la manière de les présenter qu'à l'approfondissement ou la pertinence de leur contenu;
- la participation et les productions du climathon dépendent d'un contexte particulier avec des aléas possibles, à l'image du Covid qui a limité l'ampleur du climathon de Montpeyroux (veille du confinement);
- enfin, l'appropriation de la démarche par les acteurs de ces communes est ici restée liée à l'implication de scientifiques, rejoignant une critique formulée sur la difficile autonomisation des démarches participatives pour la transition agro-écologique (Bergez *et al.*, 2019).

Les conditions de réussite d'un climathon viticole

La mise en évidence des intérêts et limites des climathons viticoles permet de suggérer des conditions qui peuvent assurer leur succès, rejoignant certaines consignes de la Climate-KIC ou présentées dans la littérature de « coproduction citoyenne » (Mees, 2022) :

- première condition, la diversité de participants doit se construire en recherchant un compromis entre représentativité des catégories d'acteurs, complémentarité de compétences et motivations des participants, mais aussi entre acteurs « légitimes » et acteurs moins visibles voire « marginaux ». Des invitations ciblées, parfois insistantes, sont nécessaires pour compléter les acteurs « volontaires et motivés » et éviter un « entre-soi »;
- de fait, en amont de l'évènement, sa préparation est une condition majeure, qui suppose un investissement important en temps et un budget minimum. L'engagement d'un responsable local politique ou viticole, connaissant les conditions de la participation dans la commune et la diversité des acteurs et du tissu socioprofessionnel, nous a semblé un apport important;
- l'alternance, sur un même lieu, de séquences de travail collaboratif, de temps de convivialité et de visites de terrain semble un facteur facilitant la participation sur la durée (24 heures) du climathon, alors que d'autres climathons (urbains) ont développé des séquences dans des espaces virtuels (Simmonds *et al.*, 2022);
- durant l'évènement, le rôle des animateurs et des méthodes d'animation semble central pour favoriser les interactions, avec une attention à la clarté vis-à-vis des objectifs et limites de l'exercice, à la construction d'une confiance et d'un langage commun, au respect des horaires, tout en faisant preuve de pragmatisme pour ajuster certaines séquences. Cette compétence ne s'improvise pas et doit être identifiée auparavant, soit dans l'équipe organisatrice, soit en en faisant appel à un intervenant extérieur;

Encadré II-5-5. Vineas, la plateforme collaborative pour la vigne, le vin et le changement climatique

Vineas.net est une plateforme collaborative qui rassemble des acteurs, des initiatives et des connaissances pour faire face au changement climatique dans le secteur de la vigne et du vin. Elle s'adresse à tous mais elle est particulièrement adaptée pour ceux qui accompagnent les stratégies d'adaptation ou d'atténuation des acteurs des filières : conseillers, formateurs, animateurs de projets, techniciens et chercheurs qui produisent, souvent ensemble, de la connaissance. Elle vise notamment à faciliter la production et le partage de connaissances entre acteurs de territoires viticoles distants mais pouvant s'inspirer par similitude climatique, ou anticiper des évolutions de leur climat.

La plateforme est organisée autour de 7 catégories de données ou contenus :

- identifier les **acteurs (institutions)** engagés sur ces enjeux et mettre en valeur les **projets**;
- être visible en tant que **membre actif (individu)** de la plateforme et **entrer en contact** via une interface sécurisée;
- naviguer et contribuer à la diversité des **solutions et leviers** (avec des fiches présentant une famille de solutions validée scientifiquement et des fiches de solutions spécifiques);
- explorer tous les **documents**, de la littérature scientifique aux vidéos/rediffusions d'événements, qui fournissent une base de connaissances importante allant de l'expertise locale à la recherche;
- informer et s'informer des dernières **actualités** sur le sujet et de la **presse**, tous pouvant en un clic ajouter un article sur le sujet;
- donner de la visibilité et être informé de tous les **événements**;
- poster des questions, idées, demandes d'échange d'expériences, etc., dans une **agora** faite pour **interagir** avec la communauté.

Vineas est la déclinaison Internet d'un écosystème plus large d'une communauté d'innovation sur les enjeux d'adaptation et d'atténuation de la filière Vigne et vin. L'expérience de Vineas, comme de nombreuses plateformes, montre que celle-ci doit s'accompagner d'autres composants pour faire vivre cet écosystème avec des événements en présentiel, des newsletters, des projets concrets.

Vineas a été initialement développée dans le cadre du projet Medcliv (Mediterranean Climate Vine and Wine Ecosystem), un projet financé par la Climate-KIC de l'Union européenne. Elle contribue notamment à la valorisation des travaux conduits dans le projet Laccave, mais aussi de nombreux autres projets portés par les pays viticoles européens. La plateforme est soutenue par une cellule d'animation et un conseil scientifique d'une vingtaine de personnes et institutions, dont l'OIV. Les scientifiques ont en charge la rédaction et validation scientifique des fiches génériques solutions et leviers. Indirectement, ce conseil scientifique représente aussi une arène de coopération entre scientifiques européens autour de cette thématique avec des perspectives diverses.

Pour en savoir plus

Vidéo de présentation : <https://www.youtube.com/watch?v=KAogy11ZAXQ>.

Section « À propos » du site Vineas : https://www.vineas.net/fr/7_24/602ba45e98b-b6a1a8eab39b7/a_plataforma.html.

- enfin, la communication, les rapports et publications ultérieurs, mais aussi la participation d'élus, de citoyens engagés, de scientifiques et d'organisations viticoles dans les projets proposés semblent jouer un rôle majeur pour inscrire l'évènement dans des processus de développement local de plus long terme et favoriser sa reprise dans d'autres territoires. Cette phase de valorisation (« post-production ») ne doit pas être négligée.

Intégrer la participation dans une nouvelle ingénierie des terroirs viticoles

L'expérience des trois climathons viticoles suggère plus globalement l'importance que peuvent prendre les démarches participatives dans une nouvelle *ingénierie des terroirs viticoles*. La participation semble, en effet, pouvoir s'articuler avec le recours à des analyses de données et des simulations climatiques, des diagnostics (terroir, exploitations) ou l'animation d'expérimentations chez les viticulteurs. Avec les climathons, la participation montre sa capacité à produire des idées de projets collectifs d'adaptation (*brainstorming*) et à préciser les caractéristiques de projets. Les produits du climathon doivent ensuite être remobilisés par d'autres travaux et projets. Dans ce sens, le renouvellement d'une ingénierie des terroirs viticoles peut mobiliser les approches de « l'ingénierie de la participation » déjà développées pour la gestion de l'eau et des territoires (Hassenforder *et al.*, 2021) ou l'accompagnement d'innovations agronomiques (Prost *et al.*, 2017), et intégrées dans des dispositifs de type *living labs* (Toffolini *et al.*, 2021), associant la recherche, des entreprises et des acteurs locaux pour expérimenter les options d'adaptation à l'échelle d'un territoire.

LES MODÈLES AU SERVICE D'UNE DÉMARCHE PARTICIPATIVE DE CONSTRUCTION DE STRATÉGIES D'ADAPTATION LOCALES

Audrey Naulleau, Laure Hossard, Christian Gary et Laurent Prévot

Introduction

Les modèles sont des outils privilégiés pour étudier les impacts du changement climatique en viticulture, comme le montrent les études présentées dans les trois premiers chapitres de cet ouvrage. Il apparaît alors particulièrement intéressant de les utiliser en interaction avec des acteurs, afin d'une part d'intégrer les informations que ces acteurs peuvent fournir pour l'évaluation de stratégies d'adaptation à un niveau local et, d'autre part, de leur apporter en retour des informations numériques utiles à la construction et mise en œuvre de stratégies pertinentes et efficaces. Dans ce chapitre, nous commencerons par positionner les usages des modèles vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique, dans le cadre particulier d'un territoire viticole. Nous présenterons ensuite une étude menée dans le cadre du projet Laccave, au cours de laquelle nous avons développé et mis en œuvre un processus de modélisation participative, avec des acteurs d'un bassin versant viticole méditerranéen. Cette étude visait à coconstruire et évaluer des stratégies d'adaptation qui soient à la fois pertinentes localement et évaluables par des modèles. Enfin, nous tirerons les leçons de cette étude pour donner des pistes de réflexion sur un développement et un usage « orienté acteurs » des modèles.

Les modèles mécanistes : incontournables mais insuffisants pour penser l'adaptation au changement climatique

L'un des principaux défis posés par le changement climatique à l'agriculture est de prévoir les conditions de production futures afin d'ajuster les systèmes, tout en évitant de les rendre plus vulnérables en cas de mal-adaptations (Mosedale *et al.*, 2016). Les sciences du climat fournissent des séries climatiques et des indicateurs régionalisés sur l'évolution des conditions climatiques jusqu'à la fin du siècle⁴⁶. Les modèles mécanistes sont alors des outils permettant de traduire ces changements de conditions climatiques en impacts sur le fonctionnement des agrosystèmes (par ex. croissance des cultures, infiltration de l'eau, propagation des ravageurs), en quantifiant les mécanismes et processus au niveau de la plante et du sol.

46. Contribution du groupe de travail I au rapport d'évaluation du Giec, dont les données sont en partie disponibles pour la France sur le site : <http://www.drias-climat.fr>.

Des modèles pour prévoir les impacts du changement climatique sur le temps long

En viticulture, les modèles mécanistes (chapitre I-1) permettent de prévoir l'impact de la hausse des températures sur le cycle phénologique de la vigne (Morales-Castilla *et al.*, 2020), ainsi que l'impact des changements de pluviométrie sur le bilan hydrique (Pieri *et al.*, 2012), ou encore celui de ces deux variables sur le rendement et la qualité des baies (García de Cortázar-Atauri, 2006).

Parce qu'elle est une plante pérenne, la vigne est gérée à l'échelle d'une parcelle ou d'une exploitation en articulant différentes échelles de temps (fig. II-6-1). En effet, l'adaptation de la vigne dépend à la fois de variables bioclimatiques et de pratiques réparties selon trois temps : le temps long de la durée de vie de la vigne (plusieurs décennies), caractérisé par un climat régional et des choix stratégiques à la plantation ; le temps rond de la saison culturale (un an), marqué par le cycle phénologique de la vigne et par les pratiques liées aux conditions de production des années précédentes et en cours ; et le temps court des choix tactiques selon les conditions météorologiques (un jour à quelques semaines). Grâce au grand nombre d'expérimentations virtuelles qu'ils autorisent, les modèles mécanistes permettent l'exploration de combinaisons de pratiques et de conditions climatiques, à différentes échelles de temps, pour concevoir des systèmes de culture répondant aux enjeux du changement climatique à court et long termes.

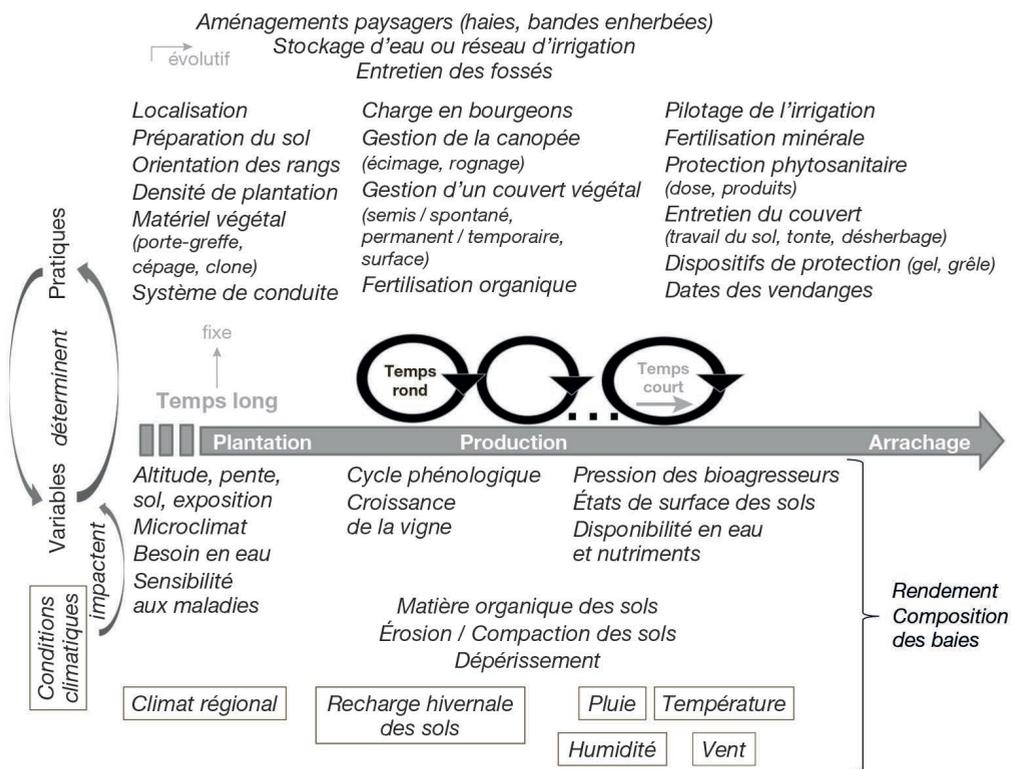


Figure II-6-1. Impacts du changement climatique et des pratiques sur un système viticole, selon les trois temps de la vigne (long, rond et court). Source : com. pers. A. Metay.

Cependant, l'usage des modèles demande de larges bases de données et des précautions dans l'interprétation de leurs résultats (Van Leeuwen *et al.*, 2013). Tout d'abord, la plupart des modèles utilisés pour la vigne sont adaptés de modèles de cultures annuelles et intègrent difficilement le temps long, comme les phénomènes de dépérissement ou l'effet de stress successifs. Ensuite, les incertitudes liées au paramétrage des modèles, aux données d'entrée et à l'évolution des gaz à effet de serre compliquent l'analyse des impacts du changement climatique. De plus, ces modèles ne prennent pas en compte les effets d'événements extrêmes, parfois infrajournaliers, tels que pics de chaleur, grêle ou gel, dont la fréquence est susceptible d'augmenter dans le futur. Chaque modèle est donc empreint d'un domaine de validité qu'il est nécessaire de préciser.

Des modèles pour représenter une grande variabilité spatiale

Non seulement les conditions climatiques et les pratiques varient dans le temps, mais elles sont très variables dans l'espace, en particulier en viticulture. Il est ainsi commun de retrouver au sein d'un petit espace des conditions pédoclimatiques et des systèmes de culture très différents, auxquels le produit final, le vin, est fortement sensible. Cette diversité territoriale se retrouve à l'échelle des exploitations où plusieurs stratégies de production peuvent coexister, selon les terroirs, l'accès à l'eau ou les circuits commerciaux (cave coopérative/particulière, labellisation). Cette variabilité spatiale constitue un levier pour l'adaptation au changement climatique, surtout lorsqu'elle permet de diversifier les sources de revenus, d'aller vers des conditions climatiques plus fraîches (altitude, exposition) ou d'obtenir un accès à l'irrigation. Les modèles spatialisés peuvent fournir une représentation fine de ce levier.

L'étendue spatiale d'un modèle peut être celle de la plante, de la parcelle, de l'exploitation, d'un bassin versant, de la région, du pays ou du monde. Du choix de cette étendue dépendra le niveau de détails du modèle et donc des données nécessaires. Les données climatiques sont, au mieux, fournies sur des mailles de l'ordre de la centaine de kilomètres carrés. Des travaux permettent de désagréger ces séries climatiques à une échelle plus fine pour prendre en compte des effets microclimatiques (Le Roux *et al.*, 2017). Certaines données pédologiques existent également à des grains plus ou moins fins, selon les régions viticoles. Cependant, les informations sur les pratiques culturales (par ex. cépage, type de taille, année de plantation) et leurs performances (par ex. rendement, coût, produit brut) sont généralement plus difficiles à obtenir sur de larges territoires. C'est pourquoi la modélisation pour l'adaptation au changement climatique requiert également la participation d'acteurs des territoires, notamment pour mieux représenter les terroirs et pratiques locales afin d'en identifier les potentialités d'adaptation.

Des modèles à mettre au service des acteurs et enjeux des territoires pour concevoir des stratégies d'adaptation

Au sein d'un territoire, il existe des opportunités et des contraintes qui déterminent pourquoi, comment, où et quand mobiliser des leviers d'action. La conception de stratégies d'adaptation au changement climatique, faisant sens localement, explore des combinaisons cohérentes et interconnectées de leviers d'adaptation afin de favoriser des synergies et de lever les contraintes entre leviers. Ces synergies se situent à l'interface entre plusieurs échelles imbriquées du territoire (fig. II-6-2). Par exemple, l'installation de l'irrigation à l'échelle de la parcelle est dépendante du développement d'un réseau ou

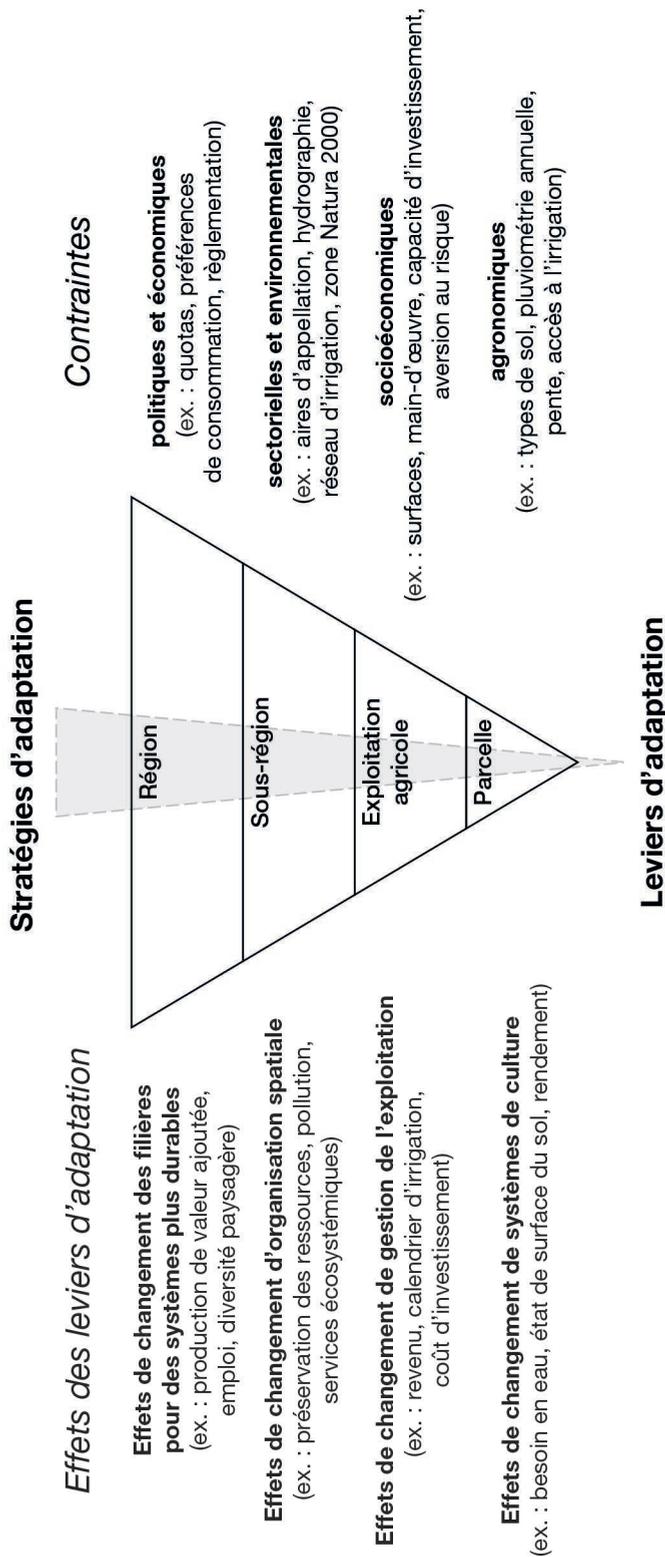


Figure II-6-2. Des leviers à des stratégies d'adaptation : prise en compte des effets et des contraintes à différentes échelles du territoire. D'après Chopin et al., 2017.

de stockages d'eau à l'échelle régionale. Ce même levier « irrigation » est dépendant de la capacité — organisationnelle, financière, matérielle — de l'exploitation à investir dans un tel équipement. L'étude de ces interactions nécessite donc de se placer à l'échelle du territoire (Chopin *et al.*, 2017), défini comme le lieu où interagissent processus biophysiques, pratiques culturelles et acteurs. Les systèmes de culture s'y répartissent en fonction de variables physiques (par ex. types de sol, topographie, hydrographie), techniques (par ex. réseau d'irrigation) et institutionnelles (par ex. zone d'appellation).

Évaluer des stratégies d'adaptation au sein d'un territoire nous incite à nous interroger sur le rôle des acteurs dans le processus de modélisation. Ceux-ci peuvent être consultés pour décrire leur territoire, apporter des informations non disponibles par ailleurs comme les pratiques viticoles, les rendements réels, etc. Mais ils peuvent être aussi porteurs d'enjeu et avoir un rôle plus collaboratif dans le processus de modélisation. Le modèle peut alors être construit avec une diversité d'acteurs, ses résultats quantitatifs peuvent être discutés et enrichis. Les stratégies conçues peuvent aboutir à des plans d'action concrets, nécessitant l'arbitrage entre différents enjeux.

La mobilisation de modèles au service de la réflexion des acteurs d'un vignoble méditerranéen

L'étude présentée ci-après a été menée dans le cadre du projet Laccave. Elle met en œuvre un processus de modélisation participative au service des acteurs d'un bassin versant viticole méditerranéen, pour évaluer, à l'aide d'un modèle mécaniste *ad hoc*, des stratégies d'adaptation coconstruites.

Présentation de l'étude

Le bassin versant du Rieutort (45 km²), affluent de l'Orb, situé à 15 km au nord de Béziers, est composé d'un vignoble d'une surface de 1500 ha, qui couvre 80% des surfaces cultivées (RPG, 2017) et comprend 136 exploitations agricoles. Ce vignoble se situe à l'interface entre la plaine biterroise au sud et les coteaux des AOP Saint-Chinian et Faugères au nord (fig. II-6.3) :

- 20% du vignoble se situent sur les coteaux de schistes, au nord où les parcelles sont regroupées en îlots entourés de forêts ou de garrigues. La vigne y est souvent localisée sur les versants exposés au sud et parfois conduite en gobelet. Les objectifs de rendement y varient entre 30 et 45 hL/ha ;
- 60% se situent dans la zone centrale, argilocalcaire, où les parcelles sont souvent organisées sous forme de « terrassettes ». Très hétérogène, ce secteur se caractérise par des objectifs de rendement allant de 45 à 90 hL/ha ;
- 20% se situent dans la zone de la plaine alluviale, au sud, où les parcelles sont grandes (> 1 ha) et planes. Les vignes y sont majoritairement irriguées en goutte à goutte. Les objectifs de rendement dépassent souvent 90 hL/ha.

La démarche s'est organisée en trois étapes, chacune intégrant la participation des acteurs du bassin d'étude (fig. II-6-4). La première étape est celle de la construction du modèle. Elle inclut la construction participative d'un schéma conceptuel et le développement du modèle numérique. La deuxième étape est la phase de test du modèle.

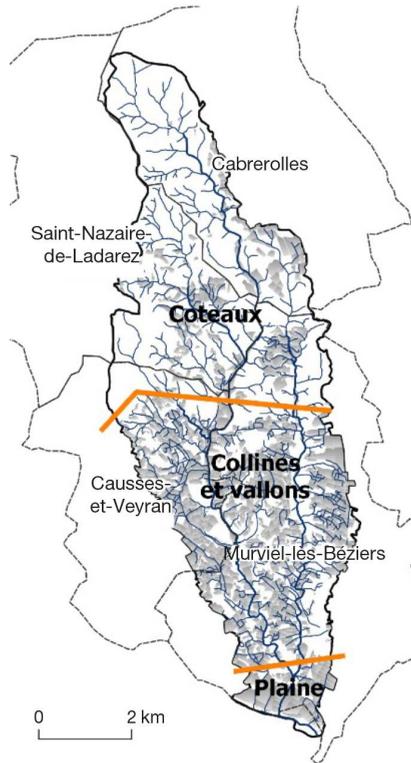


Figure II-6-3. Bassin versant du Riutort. En gris, les parcelles de vignes, en bleu le réseau hydrographique, en pointillé les limites communales.

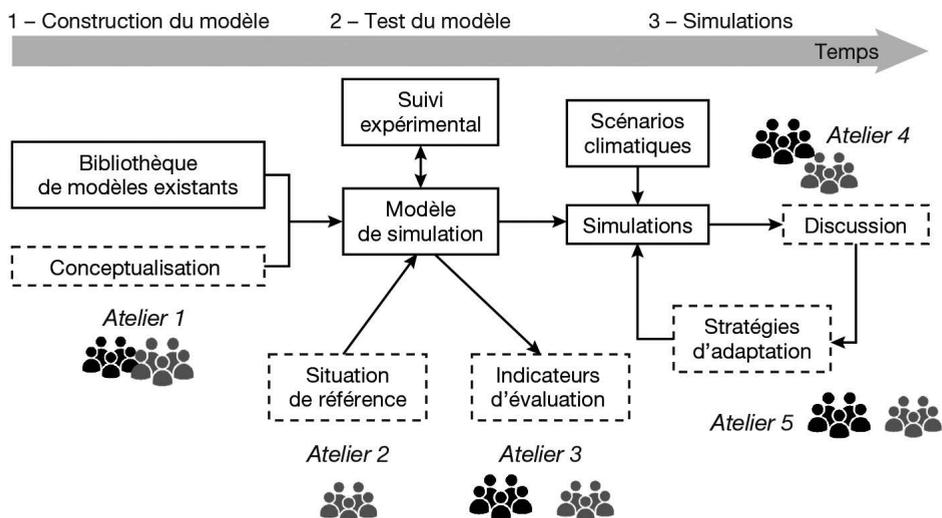


Figure II-6-4. Présentation générale de la méthode. Sont encadrées en pointillé les activités menées avec les acteurs; en traits continus, celles menées par les chercheurs. Le groupe d'acteurs locaux est représenté en gris, les acteurs régionaux en noir.

Elle s'est déroulée en trois temps, avec la description de la situation de référence, puis l'analyse des simulations du modèle, à la fois quantitative (suivi agronomique) et qualitative (en atelier). Une fois la description et la simulation de la situation de référence validées par les acteurs pour la période historique (1981-2010), la troisième étape consiste à simuler cette même situation sous scénarios climatiques futurs, puis à construire des stratégies d'adaptation à leur tour simulées et analysées sous climats futurs.

En pratique, la démarche s'est organisée autour de cinq ateliers collectifs, entrecoupés de phases de modélisation. Elle a mobilisé des acteurs locaux et régionaux (tableau II-6-1) pour partager leurs perceptions des impacts du changement climatique et les actions envisagées, caractériser la diversité locale des systèmes viticoles (situation de référence) et définir les indicateurs d'évaluation, échanger sur les résultats des simulations sous conditions climatiques futures, construire des stratégies d'adaptation, et discuter les adaptations et leurs performances.

Tableau II-6-1. Acteurs impliqués dans la démarche. Le nombre moyen de participants est indiqué entre parenthèses.

Secteurs	Échelle locale	Échelle régionale
Profession viticole	Viticulteurs/trices (indépendants et coopérateurs) (4) Cave coopérative (1) Syndicats d'AOP (2) Service d'appui et de conseil (2)	Service d'appui et de conseil (chambre d'Agriculture) (2) Institut technique de la vigne et du vin (IFV) (1)
Eau et environnement	Établissement public territorial de bassin (1)	Établissement public territorial de bassin (1) Conseil départemental (1)
Recherche	Chercheurs (4)	Chercheurs (4)

Le modèle de simulation développé au cours de cette démarche est composé de quatre modules permettant de simuler les dynamiques spatiotemporelles de l'eau (évapotranspiration, infiltration, ruissellement) ainsi que celles de la production viticole à l'échelle de la parcelle. Ces modules ont été couplés temporellement et spatialement grâce à la plateforme Openfluid (Fabre *et al.*, 2013) permettant des simulations sur l'ensemble du bassin versant, pour des périodes de 30 ans. Les impacts du changement climatique et des stratégies d'adaptation ont été évalués pour le scénario climatique le plus pessimiste (RCP 8.5), à partir des données issues du modèle CNRM-Aladin et pour trois horizons temporels : 1981-2010, 2031-2060 et 2071-2100.

Une hétérogénéité des impacts du changement climatique au sein du territoire

Les impacts quantifiés par le modèle concernent la phénologie, le risque climatique sur la quantité et la qualité de la récolte (gel, échaudage et températures hautes pendant la maturation des baies), les besoins en eau d'irrigation, les rendements permis par la disponibilité en eau et le volume de production à l'échelle du bassin versant. La mobilisation des acteurs dans le processus de modélisation a permis de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du milieu et des systèmes de cultures, en distinguant huit

secteurs de production (climat × sol × appellation × pratiques). Les simulations de la situation de référence en RCP 8.5 montrent des impacts différenciés selon ces secteurs (Naulleau *et al.*, 2022a).

À l'horizon 2100, l'avance phénologique est plus prononcée dans le nord du bassin versant avec une maturité avancée de 3 semaines, contre 2 semaines dans le sud du bassin. Les dates de débourrement de la vigne sont également avancées, dans une moindre mesure (7 à 13 jours). Mais un débourrement plus précoce n'entraîne pas d'augmentation du risque de gel puisque la date de la dernière gelée avance également dans le climat futur. Les effets combinés de l'avance phénologique et de l'augmentation des températures conduisent par contre à un risque accru de dommages liés aux hautes températures (brûlures sur feuilles ou fruits, échaudage), entre la floraison et la véraison à l'horizon 2100. De même, les conditions de maturation des baies évoluent rapidement : les températures nocturnes augmentent de 3,5°C et de 6°C aux horizons 2050 et 2100, ce qui pourrait altérer les processus de maturation des baies. Dans le scénario climatique futur, les besoins en irrigation sont multipliés par 1,8 à l'horizon 2050 et par 2,3 d'ici la fin du siècle, en comparaison à la simulation de la situation actuelle.

Dans le scénario RCP 8.5, les rendements diminuent de 0 à 20% en 2050 selon les secteurs, et jusqu'à 30% en 2100 pour les secteurs les plus productifs du sud du bassin. L'importante baisse de rendement dans ces secteurs peut s'expliquer par les quantités de précipitations annuelles particulièrement faibles (moyenne < 530 mm/an). À l'échelle du bassin versant, la production totale de raisin pourrait diminuer de 10% à l'horizon 2050, et jusqu'à 14% en 2100, bien que les apports en eau d'irrigation soient doublés (fig. II-6.5). Le type de production qui subit la baisse la plus importante est la production IGP non irriguée. Les systèmes en production AOP, situés au nord du bassin, seraient moins impactés, car subissant déjà une contrainte hydrique et donc adaptés à celle-ci.

Quatre stratégies d'adaptation

Quatre stratégies d'adaptation ont été construites avec les acteurs (Naulleau *et al.*, 2022b) :

- retarder les vendanges en utilisant des cépages plus tardifs et en favorisant un microclimat plus frais l'été (haies, orientation des rangs, hauteur de ceps) ;
- limiter la contrainte hydrique en augmentant les surfaces irriguées et en réduisant les besoins en eau de la vigne (gestion du rapport feuille/fruit, ombrage, *mulch*, réduction de la densité de plantation, cépages tolérants à la sécheresse) ;
- relocaliser les vignes dans le bassin ;
- renforcer l'exploration du réservoir utile du sol par la vigne (apport de matière organique, décompactage, qualité des greffons et des techniques de greffage).

Chaque stratégie d'adaptation correspond à une combinaison de leviers d'adaptation mis en place sur différents secteurs. Dans le cadre permis par le modèle numérique, seules les trois premières stratégies d'adaptation ont pu être partiellement simulées.

La stratégie basée sur le retard de la date de vendange grâce à des cépages tardifs a été simulée, en considérant la mise en place d'un cépage tardif (type Cabernet-Sauvignon) sur l'ensemble du bassin. Elle n'a montré qu'un léger effet sur les dates de vendange (- 1 semaine par rapport à l'encépagement actuel), sans avoir d'impact important sur les températures pendant la maturation des baies (+ 5,4°C au lieu de + 6°C à l'horizon 2100).

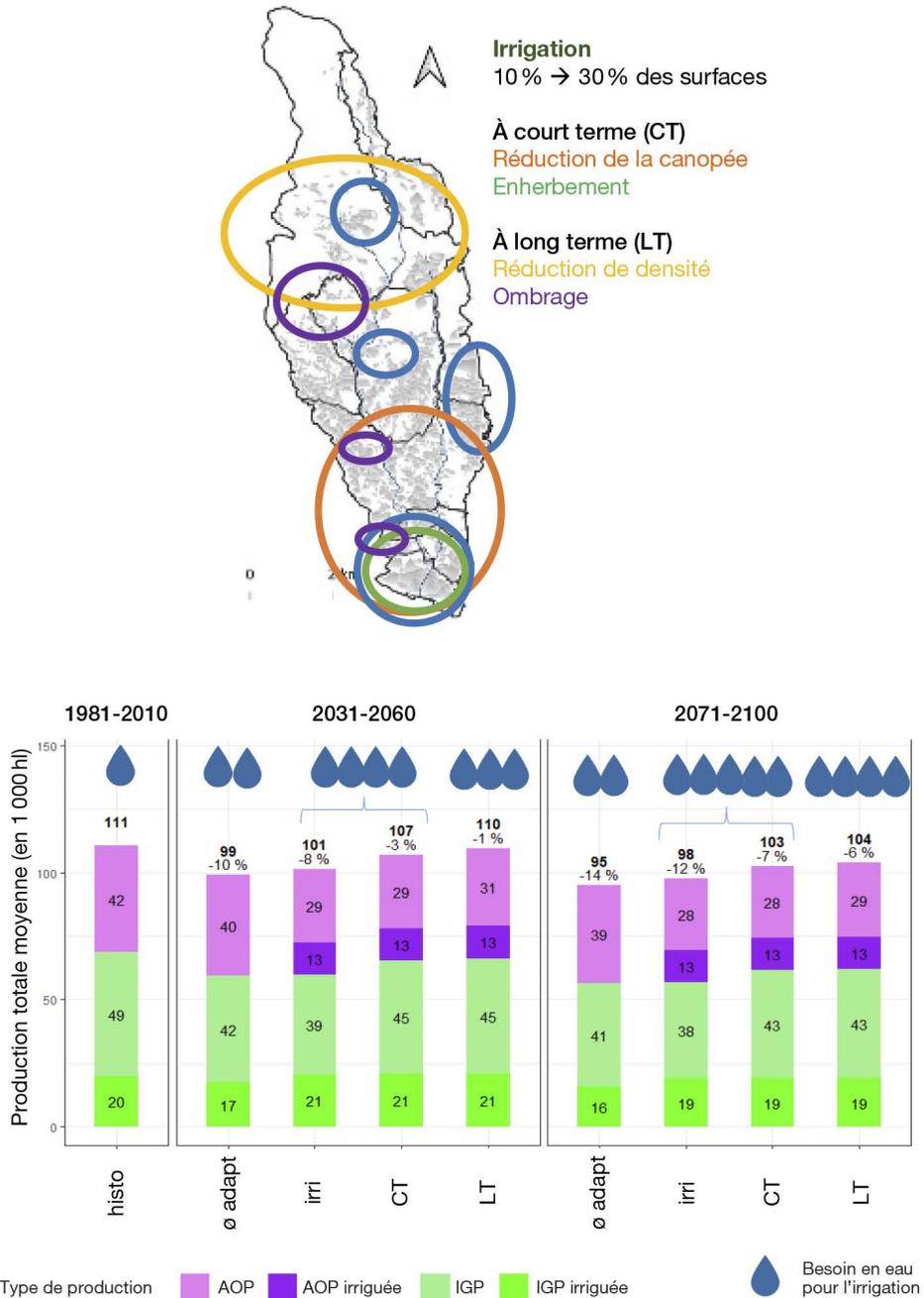


Figure II-6.5. Évolution de la production viticole totale et du besoin en eau d'irrigation à l'échelle du bassin versant, en fonction de deux horizons temporels (RCP 8.5) et de trois stratégies d'adaptation pour limiter la contrainte hydrique. Irri : développement de l'irrigation sur 30% du vignoble; CT : adaptation à court terme (réduction du feuillage, enherbement); LT : adaptation à long terme (réduction de la densité, ombrage).

La stratégie basée sur la limitation de la contrainte hydrique par des pratiques économes a été déclinée en trois sous-stratégies, selon l'importance des adaptations à mettre en œuvre. Dans un premier temps, les acteurs ont envisagé une augmentation des surfaces irriguées (stratégie irri) par extension des réseaux existants ou par réalisation de retenues collinaires. Cette stratégie prévoit le triplement (de 10 à 30%) des surfaces irriguées à l'échelle du bassin. Puis, ils ont envisagé en complément la mise en place d'adaptations à court terme (stratégie CT), telles que la réduction du feuillage et la mise en place d'un enherbement dans les secteurs sud du bassin. Enfin, des leviers à plus long terme (stratégie LT), comme la réduction de la densité et la mise en place de filets d'ombrage, ont été envisagés sur les secteurs en AOP du nord. Ces différentes stratégies permettent de compenser la perte de production à l'horizon 2050 à l'échelle du bassin, uniquement si des mesures fortes sont prises (réduction de densité, ombrage) et tout en développant l'irrigation sur les zones où cela est possible, mais en multipliant par 4 à 5 les apports d'eau par irrigation à l'échelle du bassin (fig. II-6.5).

Enfin, l'extension du vignoble a été envisagée en réimplantant des parcelles de vigne sur les surfaces où elle était présente dans les années 1970, majoritairement au nord du bassin. Cette extension des surfaces viticoles, de l'ordre de 20%, permettrait de compenser la perte de production à l'échelle du bassin. Toutefois, cette stratégie fait l'hypothèse forte que cette extension soit possible (accessibilité des parcelles, coût, force de travail disponible, etc.).

Des résultats discutés par les acteurs

Bien que les résultats de modélisation n'aient pas été remis en cause, des compléments ont été apportés par les acteurs, notamment sur l'irrigation et la prise en compte de l'échelle de l'exploitation.

Concernant l'irrigation, les résultats du modèle n'indiquent qu'un besoin théorique en eau en fonction de l'objectif de production, et non un apport réel d'eau. De plus, le modèle suppose que l'eau pour l'irrigation est toujours disponible, ce qui n'est pas toujours le cas avec des retenues collinaires, comme souligné par les viticulteurs du groupe d'acteurs locaux. Les acteurs locaux (viticulteurs et représentants du syndicat AOP et de la cave coopérative) ont donc souligné l'importance de mieux expliciter les objectifs de l'irrigation (survie de la vigne, maintien d'une viabilité économique ou augmentation de la production) et de mieux contrôler son utilisation (outils de pilotage, régulation, prix). Un représentant de l'IFV (groupe d'acteurs régionaux) a également souligné que le modèle ne permettait pas, à ce jour, d'estimer l'effet de l'irrigation pour diminuer la mortalité des ceps.

Concernant la prise en compte du fonctionnement économique de l'exploitation viticole, les acteurs locaux (représentants du syndicat d'AOP et de l'établissement public territorial de bassin) ont proposé une analyse *post-simulation* du coût et du bénéfice de chaque levier modélisé en estimant, d'une part, les coûts supplémentaires ou évités liés au nouvel itinéraire technique et, d'autre part, les bénéfices liés à l'augmentation des rendements simulés. Ces estimations ont montré que toutes les adaptations proposées dans la stratégie de réduction de la contrainte hydrique seraient économiquement viables. Ces estimations économiques ont aussi permis d'aborder de nouvelles pistes d'adaptation orientées vers le marché et la meilleure valorisation des prix de vente du vin, suggérées en particulier par les acteurs locaux et questionnant leur possibilité d'activer ce levier « prix ».

Certains des leviers envisagés par les acteurs n'ont pu être évalués numériquement par le modèle (cépages tolérants à la sécheresse, plantation de haies, changement de système de conduite, etc.). Ces leviers ont tout de même été évalués qualitativement au cours du dernier atelier au regard de leur « souhaitabilité » et de leur faisabilité. Cet exercice a montré certains résultats consensuels entre les deux groupes d'acteurs. Par exemple, les leviers évalués par le modèle comme les plus efficaces en termes de production, tels que les filets d'ombrage ou l'irrigation, n'étaient ni les plus souhaitables ni les plus faisables, pour des raisons de disponibilité de la ressource en eau, de coût ou d'esthétique. Les leviers les plus souhaitables et faisables étaient l'amélioration de la qualité du sol et les systèmes de conduite efficaces en eau, leviers non évalués par le modèle. Des simulations permettant de quantifier l'effet de levier améliorant la qualité du sol et l'exploration de son réservoir utile auraient été particulièrement intéressantes, mais les connaissances actuelles n'ont pas permis de les modéliser.

Pour les acteurs régionaux, la gestion adaptative de l'enherbement (non simulée par le modèle) était également jugée souhaitable et faisable, alors qu'elle était moins plébiscitée par les acteurs locaux. À l'inverse, les acteurs locaux ont évalué la réduction de la canopée (option simulée) comme l'option la plus souhaitable et faisable, celle-ci n'étant pas mise en avant par les acteurs régionaux. En termes de matériel végétal, les cépages tolérants à la sécheresse ont été jugés souhaitables par les deux groupes d'acteurs, qui doutaient cependant de l'existence d'un cépage « idéal » répondant à la fois aux cahiers des charges des appellations, aux défis du changement climatique et aux enjeux de réduction des produits phytosanitaires.

Opportunités et limites des modèles pour la construction participative de stratégies d'adaptation

L'engagement précoce des acteurs dans le processus de modélisation a permis de réaliser un couplage original de modèles. Les acteurs ont orienté les choix de développement du modélisateur vers des processus qu'ils jugeaient prioritaires. Ainsi, un travail approfondi a pu être effectué pour mieux estimer les rendements viticoles en fonction du niveau de contrainte hydrique. La combinaison de données issues d'un suivi agronomique sur des parcelles du bassin versant, ainsi que d'expérimentations conduites par des instituts techniques ou des instituts de recherche, a permis de développer le modèle GraY, modèle semi-empirique de prévision du rendement en fonction des contraintes hydriques de l'année en cours et de l'année précédente (Naulleau *et al.*, 2022a).

Un processus de modélisation enrichi par des connaissances locales et expertes

Les stratégies coconstruites, et donc les simulations, ont l'avantage d'être pertinentes localement selon les acteurs locaux, puisqu'elles se basent sur des propositions qu'ils jugent pertinentes pour leur terroir et son évolution. Il est à noter que cela peut toutefois comporter un biais dans le cadre du changement climatique, car ces propositions dépendent de la définition et de l'objectivisation de la situation future, qui restent par définition théoriques, car non vécues. En effet, bien que des informations issues des

projections futures aient été discutées en détail, la projection dans un futur radicalement différent en termes de climat reste difficile, au-delà d'évènements déjà vécus. Ces stratégies ont un certain caractère innovant, dans le sens où elles sortent du cadre de ce qui est inscrit actuellement dans les cahiers des charges des appellations. Cependant, elles restent conservatrices dans leur objectif, qui demeure un maintien de la production viticole dans la région. Il s'agit ainsi de stratégies d'adaptation et non de transformation (au sens de Folke *et al.*, 2010), n'engendrant pas la reconception du système (au sens de Hill et MacRae, 1996) au profit d'autres cultures, secteurs ou activités. Cela peut être lié au profil des participants, la grande majorité étant des acteurs du secteur viticole et cherchant à le rester. Pour construire des stratégies plus en rupture, il serait nécessaire de convier une plus grande diversité d'acteurs dans la démarche, ou que les chercheurs eux-mêmes proposent des stratégies plus extrêmes. Cependant, le principal frein à la simulation de stratégies plus audacieuses a été ici le nombre restreint de leviers simulables par les modèles mécanistes actuels.

Des connaissances locales et expertes enrichies par le processus de modélisation

L'évaluation de la démarche par les participants a mis en lumière que les attentes des deux groupes de participants étaient de *voir, savoir* et *connaître* les effets du changement climatique et ses adaptations — autant d'attentes partiellement atteintes. En effet, le processus de modélisation les a aidés à mettre des ordres de grandeur concrets sur des perceptions qu'ils avaient sur le terrain. Nous n'avons pas pu observer de changement dans l'action pendant la durée de l'étude (deux ans), à l'exception d'un viticulteur nous ayant rapporté avoir modifié l'orientation des rangs d'une nouvelle plantation, suite aux échanges pendant les premiers ateliers. Cependant, les acteurs locaux, et en particulier les viticulteurs et représentants des AOP, affirment avoir davantage conscience des leviers à leur portée pour s'adapter au changement climatique et témoignent de leur envie d'innover. Les acteurs régionaux soulignent que cette étude vient renforcer les dynamiques déjà en cours pour fournir de l'information sur le changement climatique et ses adaptations, tout en élargissant le panel de leviers à envisager, dépassant le seul cadre de l'extension de l'irrigation.

Le principal point fort de l'étude mis en avant par les deux groupes d'acteurs est l'*échange* et le *partage* d'informations que le processus de modélisation a permis de provoquer à plusieurs étapes. À quel climat doit-on s'attendre dans le futur? Quelles adaptations le modèle doit-il considérer? Comment peuvent-elles être réparties dans l'espace? Quels types de performances en attend-on? Le modèle coconstruit a ainsi montré sa capacité à simuler plusieurs secteurs contrastés de production, avec des impacts du changement climatique différenciés (Naulleau *et al.*, 2022a). Cela s'est révélé important pour les deux groupes d'acteurs, en permettant, d'une part, aux acteurs locaux d'anticiper des impacts différenciés selon leurs localisations, les parcelles des viticulteurs étant souvent distribuées dans plusieurs secteurs; et d'autre part, aux acteurs régionaux d'identifier des contrastes entre situations de production représentatives du vignoble languedocien. Si le modèle n'a pas permis de simuler l'ensemble des leviers imaginés par les acteurs, il a fourni des informations sur l'effet de différents leviers et de leurs combinaisons, mettant en lumière la capacité des modèles à explorer de larges gammes de variation. Enfin, les simulations sur 30 ans ont montré des variabilités interannuelles, notamment en termes

de besoin en irrigation (Naulleau *et al.*, 2022b). Cette variabilité temporelle est particulièrement critique pour les viticulteurs et les coopératives, une baisse de production drastique pouvant mettre en péril leur activité. Cependant, le principal point faible de la démarche correspond aux limites et incertitudes de ces modèles. On peut en effet se demander si les connaissances actuelles en termes de modélisation mécaniste de la vigne sont suffisantes pour engager ces modèles dans une approche participative, et comment combler ces lacunes pour un usage au service des acteurs.

Conclusion et perspectives

À ce jour, peu d'études ont articulé modélisation et participation pour réfléchir à l'adaptation au changement climatique. En revanche, des cadres conceptuels le faisant existent (par ex. modélisation d'accompagnement; ComMod, 2005), tout comme des démarches précurseurs d'intégration de la modélisation dans la mise en œuvre de démarches participatives avec des agriculteurs. Par exemple, la construction du jeu sérieux *Rami Fourrager* a mobilisé le modèle mécaniste Stics (Brisson *et al.*, 2003) pour simuler les performances de différentes combinaisons de cultures fourragères et de modes de gestion (Martin *et al.*, 2012). Ce jeu a ensuite été utilisé avec des éleveurs pour concevoir des systèmes fourragers adaptés au changement climatique, générant ainsi une réflexion stimulante sur les changements possibles (Martin *et al.*, 2012). Cependant, ces travaux n'ont pas construit le modèle avec les acteurs, et ont privilégié l'échelle de l'exploitation. Ainsi, il n'existait pas, avant cette étude, de cadre pour utiliser des modèles mécanistes à l'échelle d'un bassin versant, dans une démarche participative répondant aux défis du changement climatique. Cette étude laisse entrevoir deux principaux défis pour un usage « orienté acteurs » des modèles mécanistes : la « traduction » des sorties de simulation en une information compréhensible et utilisable par les acteurs, et l'intégration de sources d'information de natures différentes en entrée de ces modèles.

La « traduction » des sorties brutes du modèle en indicateurs d'évaluation d'intérêt pour les acteurs est une étape clé d'un processus d'évaluation de scénarios (Allain *et al.*, 2020). Cette étape est d'autant plus importante dans un contexte de changement climatique où les sorties du modèle sont nombreuses (plusieurs scénarios, plusieurs horizons temporels, etc.). La compréhension mutuelle des processus représentés dans le modèle, en lien avec les enjeux du territoire, nécessite plusieurs boucles de modélisation/participation, essentielles pour l'amélioration des représentations des sorties du modèle. Notre choix d'analyse sur des périodes de 30 ans s'est montré, dans une certaine mesure, compatible avec l'approche participative, puisque les participants ont été à même de réagir sur ces projections et ont apprécié l'information climatique concrète dont ils ont pu bénéficier. Cependant, ce choix a montré des limites quant à la capacité collective à se projeter et construire des stratégies précises. Dans d'autres études, la construction participative de scénarios d'adaptation a montré des résultats satisfaisants en se focalisant sur quelques années climatiques seulement (par ex. Sautier *et al.*, 2017) ou bien en travaillant à des horizons temporels ne dépassant pas 2050 (par ex. Schaap *et al.*, 2013). Le caractère pérenne de la vigne encourage à poursuivre l'étude en considérant des années successives, mais sans doute en rapprochant l'horizon temporel de l'étude.

La représentation des activités viticoles dans le bassin versant du Rieutort en entrée du modèle a requis l'utilisation de nombreuses informations de natures différentes : données génériques issues de bases nationales (par ex. RPG, BDSol, Inao, MétéoFrance), données quantitatives fournies par les institutions locales (par ex. encépagement, densités de plantation, types de production), données issues de mesures de terrain (par ex. contrainte hydrique), informations qualitatives fournies en atelier (par ex. délimitation des types de sols). L'hybridation de ces informations a permis d'atteindre un consensus pour représenter le bassin versant d'étude et poursuivre la démarche. Cependant, ce consensus ne satisfait complètement ni les spécialistes des sols ni les viticulteurs eux-mêmes, qui font face au sein de leur exploitation à une hétérogénéité plus importante que celle représentée dans le modèle. Si cela ne remet pas en cause les résultats du modèle, cela peut limiter la capacité des viticulteurs à se « reconnaître » dans ces situations. De la même manière, la représentation des processus par le modèle est basée exclusivement sur des travaux scientifiques. Or, il existe d'autres sources de données, plus collaboratives, qui pourraient aider à orienter le développement et l'usage des modèles avec des acteurs. Nous pouvons citer par exemple la mise en place d'un observatoire de la contrainte hydrique, qui pourrait être en partie renseigné par des données issues de la collecte volontaire par les acteurs du territoire (par ex. avec l'application ApexVigne; Pichon *et al.*, 2021). Les informations collectées permettraient de mieux comprendre la variabilité actuelle du rendement et de la qualité en fonction des pratiques et des aléas climatiques. Les connaissances expertes sur certains processus non modélisés, comme la tolérance des cépages à la sécheresse, pourraient également être intégrées de façon plus qualitative (par ex. modèle Ipsim; Aubertot et Robin, 2013). Enfin, les innovations actuellement testées par les viticulteurs mériteraient d'être étudiées (Salembier *et al.*, 2016) et capitalisées pour guider leur intégration dans des simulations à plus large échelle. La combinaison de ces trois sources d'information (collecte participative, expertes et scientifiques), dans la structure d'un même outil d'évaluation basé sur la modélisation, permettrait de rapprocher les usagers finaux des résultats de modélisation.

PROSPECTIVE PARTICIPATIVE ET STRATÉGIE NATIONALE

Françoise Brugière, Patrick Aigrain, Benjamin Bois, Éric Duchêne, Iñaki García de Cortázar-Atauri, Jacques Gautier, Éric Giraud-Héraud, Hervé Hannin, Jean-Marc Touzard et Nathalie Ollat

Introduction

Dès 2003, la recherche française s'est mobilisée pour produire des connaissances à destination de la filière Vigne et vin, afin que celle-ci puisse relever le défi du changement climatique (Ollat *et al.*, 2020). Dans le cadre du projet Laccave, un exercice prospectif original a été mis en œuvre avec plusieurs finalités. Il s'agissait d'abord de contribuer à outiller l'interdisciplinarité au sein du projet et de sensibiliser les scientifiques à ce que représente un processus adaptatif, en tenant compte de ses moteurs, de ses leviers et de ses freins, le tout pour construire une vision commune de l'adaptation pour la filière Vigne et vin française à l'horizon 2050. Il est apparu ensuite important d'utiliser ces résultats dans une démarche participative pour sensibiliser les acteurs professionnels aux enjeux du changement climatique. Enfin, cette démarche a permis d'accompagner la filière dans l'élaboration d'une stratégie d'adaptation à décliner en un plan d'action (Aigrain *et al.*, 2022). L'ensemble de cette démarche est présenté dans ce chapitre.

La démarche prospective utilisée ici est fondée sur la méthode Syspahmm⁴⁷, qui consiste à élaborer des scénarios possibles pour le futur. Basée sur le principe que l'avenir n'est pas prédéterminé et qu'il peut être en partie construit en stimulant la volonté des acteurs et de leurs organisations, elle s'inscrit dans le courant des sciences de l'anticipation, créées en France par Gaston Berger ou aux États-Unis par Herman Kahn (Godin, 2005). Distincts de réelles « prévisions », car trop lointains ou trop complexes pour être probabilisables, ces scénarios « prospectifs » se doivent d'être à la fois cohérents, plausibles mais non convenus, et suffisamment distincts les uns des autres. Par leur pertinence, ils suscitent l'intérêt des acteurs qui peuvent exprimer leurs réactions lors de séances participatives de mise en débat (Ollat *et al.*, 2021). Ils aident à se projeter sur le long terme et à anticiper. Les approches prospectivistes mises en œuvre pour envisager l'adaptation au changement climatique dans l'action publique ont fait récemment l'objet d'un rapport de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique à destination de la sphère politique (Onerc, 2022), avec notamment une contribution de Laccave pour la filière Vigne et vin.

Dans le cas du projet Laccave, deux logiques d'adaptation au changement climatique (innover / se déplacer) ont été croisées pour proposer quatre stratégies possibles

47. La méthode « Système processus, agrégats d'hypothèses micro- et macrosécenarios » a été mise au point à l'Inra (M. et C. Sebillotte, 2002).

contrastées. Une démarche relativement originale de « rétrospective anticipée » a consisté ensuite à vérifier qu'il existait au moins un chemin qui soutienne le développement à long terme de chacune de ces stratégies d'adaptation. Ces chemins ont été construits entre 2014 et 2016 par une cellule d'animation, en mobilisant les résultats des recherches conduites dans le projet et des hypothèses issues d'exercices précédents de prospective sur le secteur (Sebillote, 2003; Aigrain et al., 2016a). Les quatre chemins et les stratégies d'adaptation qu'ils soutiennent ont constitué des « scénarios » (FranceAgriMer, 2016), qui ont ensuite été présentés aux acteurs du secteur lors de sept forums régionaux (Ollat et al., 2021). Ces forums participatifs avaient un triple objectif : confronter les points de vue d'acteurs liés à la filière ; les faire s'exprimer sur le caractère souhaitable ou non de ces différents scénarios ; les amener à proposer des leviers d'action cohérents à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs.

Ces éléments ont finalement constitué la charpente d'une stratégie nationale élaborée par les responsables professionnels de la filière et présentée au ministre de l'Agriculture en août 2021. Le présent chapitre décrit les différentes étapes de la démarche — sans détailler la méthodologie —, puis en discute les principaux impacts et apports, avant de conclure sur les perspectives ouvertes.

Outiller une démarche « interdisciplinaire » en utilisant les principes de la prospective

Le projet Laccave a fédéré un réseau de 22 laboratoires rattachés à INRAE, au CNRS, à des universités et grandes écoles, intégrant un large éventail de disciplines scientifiques, depuis la climatologie et la génétique jusqu'aux sciences sociales, en passant par la physiologie, l'agronomie, l'œnologie et la pathologie végétale. D'emblée, il a souhaité proposer une vision systémique de l'adaptation au changement climatique, afin de la raisonner « à différentes échelles spatiales et temporelles » et en combinant les leviers techniques aux choix de localisation des vignobles, à l'organisation du secteur, aux modes de mise en valeur des vins et au corpus réglementaire (Ollat et al., 2020). Dans cette optique, l'écriture de scénarios décrivant des futurs possibles du système Vigne et vin dans le contexte du changement climatique permet d'« outiller » une démarche interdisciplinaire et collective, et participer ainsi à l'animation du projet Laccave.

Construction de représentations communes

Cet exercice prospectif a été piloté par une « cellule d'animation » composée de prospectivistes et spécialistes de la filière — de Montpellier SupAgro, INRAE, FranceAgriMer et Inao — associés à des chercheurs du projet Laccave. Plus précisément, les responsables de chacun des groupes de travail thématiques (GTT) du projet ont été sollicités, d'une part, pour présenter les enjeux majeurs dans leur domaine d'expertise et, d'autre part, pour missionner un ou deux chercheurs de leur GTT pour participer aux travaux de la cellule d'animation.

Cet exercice a rapidement permis de construire une représentation commune interdisciplinaire du système et d'identifier des hypothèses utiles pour l'élaboration de scénarios dans les phases décrites *infra* (fig. II-7-1).

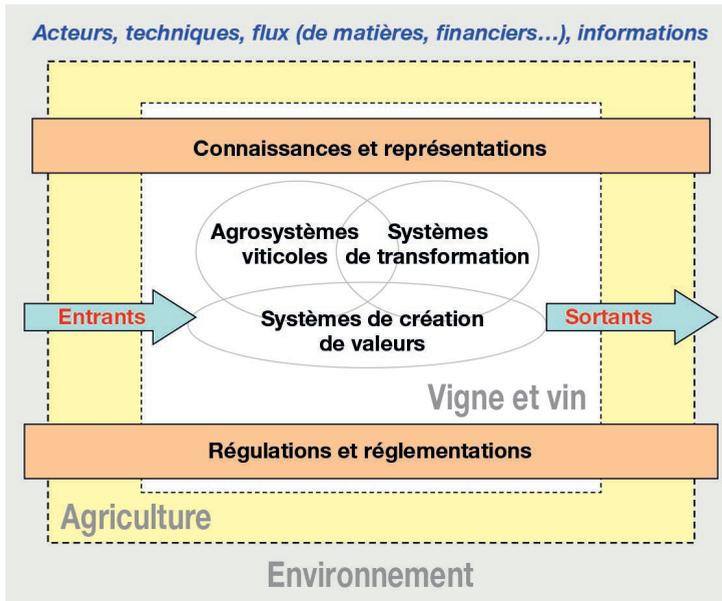


Figure II-7-1. Représentation générique et simple du système Vigne et vin.

Prédéfinir les stratégies d'adaptation

Après avoir proposé une représentation systémique du secteur et choisi un scénario climatique médian du Giec en 2050 (+ 2°C), l'originalité de la méthode a consisté à prédéfinir quatre stratégies d'adaptation envisageables à partir des leviers d'adaptation identifiés dans les travaux de recherche. Pour la vigne et le vin, les modalités d'adaptation au changement climatique peuvent s'envisager comme résultant de la mise en œuvre d'innovations techniques, de relocalisation du vignoble et de changements institutionnels, organisationnels.

Les innovations techniques concernent notamment le choix du cépage et de son porte-greffe (Duchêne *et al.*, 2010), de nouveaux modes de conduite de la vigne (Van Leeuwen *et al.*, 2019), l'irrigation de précision (Ojeda *et al.*, 2017), les pratiques œnologiques (Dequin *et al.*, 2017).

La relocalisation du vignoble peut s'opérer au sein d'un même terroir, en valorisant son hétérogénéité pédoclimatique (de Rességuier *et al.*, 2020), ou s'envisager à des échelles géographiques plus étendues, y compris dans des régions où la vigne est marginale (Zavlyanova *et al.*, 2023).

Les changements institutionnels et organisationnels sont notamment liés aux indications géographiques (AOP et IGP) qui couvrent 93% du vignoble français, et dont l'Inao gère la délimitation des aires de production, ainsi que la vitesse d'intégration dans les cahiers des charges des innovations techniques et réglementaires. Les changements institutionnels et réglementaires cadrent donc fortement la localisation et l'innovation technique, et peuvent être vus comme des conditions à leur mise en œuvre. La cellule d'animation a par conséquent choisi de privilégier le déplacement et l'innovation, deux axes *a priori* moins dépendants, pour prédéfinir des stratégies d'adaptation (Aigrain *et al.*, 2016) :

- le degré de déplacement des vignobles peut donc varier d'un maintien strict dans le périmètre des aires actuelles jusqu'à un déplacement important (abandon et création de régions viticoles), en passant par des relocalisations au sein ou aux frontières d'une aire de production. Cette mobilité permet de retrouver des conditions climatiques «plus favorables» ailleurs (selon l'altitude, la latitude, en tenant compte des types de sol...);
- l'ampleur de l'innovation technologique (viticole ou œnologique) peut présenter différentes intensités, depuis la prolongation d'innovations actuelles jusqu'à des innovations de rupture (biotechnologies, OGM, association avec d'autres cultures, voire agrivoltaïsme...). Les innovations permettent de modifier le fonctionnement du système Vigne et vin, en atténuant les impacts ou en tirant profit du changement climatique.

Le croisement de ces deux axes permet de proposer quatre stratégies d'adaptation (fig. II-7-2) :

- la stratégie « conservatrice », qui n'intègre que des changements à la marge dans les vignobles actuels;
- la stratégie « innover pour rester », qui ouvre les vignobles à une large gamme d'innovations techniques, permettant de maintenir globalement les localisations actuelles;
- la stratégie « vignobles nomades », qui donne la priorité à la relocalisation des vignobles, en fonction des nouvelles conditions climatiques;
- la stratégie « libérale », qui permet de tester une situation où « tout est possible partout ».

Une stratégie d'« adaptation 0 », qui ne ferait évoluer ni les pratiques ni la localisation, a été écartée. Un système figé, sans réaction aux modifications climatiques, a en effet été jugé trop caricatural et invalidé par l'histoire viticole, faite d'adaptations permanentes mises en œuvre à des rythmes variables.

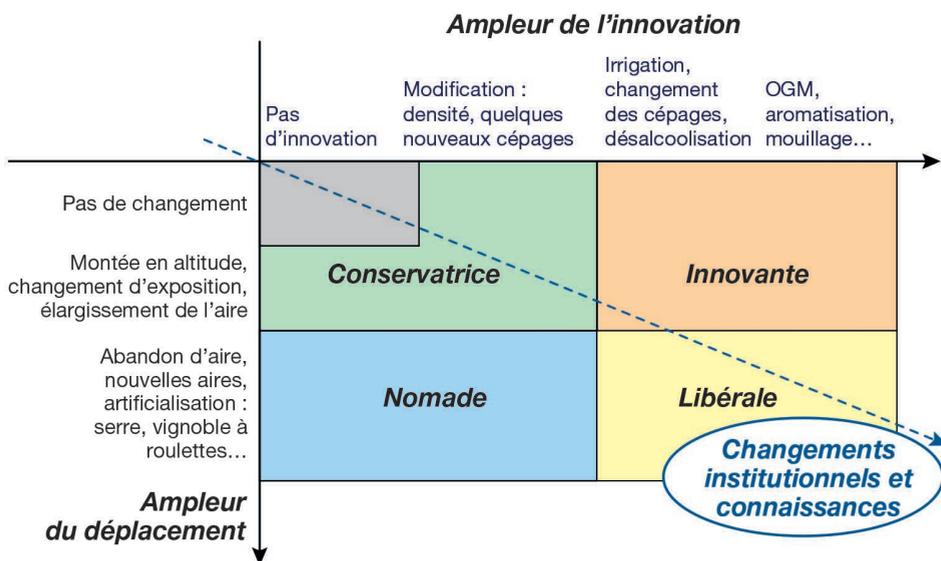


Figure II-7-2. Les quatre stratégies d'adaptation prédéfinies. Source : FranceAgriMer, 2016.

Les sources d'hypothèses

Pour construire ensuite des chemins qui soutiennent le développement de chacune de ces stratégies d'adaptation, un corpus d'hypothèses a été constitué, sous forme de phrases simples exprimées en recto et en verso, à partir :

- des travaux des chercheurs du projet Laccave, couvrant de nombreux domaines et disciplines scientifiques. Par exemple, en recto « De nouvelles pratiques œnologiques sont développées et permettent de conserver les caractéristiques actuelles des vins » et en verso « Il n'y a pas d'innovations œnologiques qui permettent de conserver les caractéristiques actuelles des vins » ;
- des interviews de professionnels de plusieurs régions viticoles (Juan, 2014). Par exemple, en recto « Malgré la pression du changement climatique, l'intégration de l'innovation et l'évolution des pratiques en AOP restent lentes et collectives » et en verso « Le changement climatique conduit à une accélération de l'intégration des innovations en AOP et à la possibilité d'expérimentations individuelles ».

Mais le changement climatique n'agit pas seul sur le système Vigne et vin. Différentes forces comme la préoccupation croissante (de la société, de l'Organisation mondiale de la santé) par rapport aux effets de l'alcool sur la santé, l'extension ou non des échanges mondiaux à de nouveaux pays, les révisions de la Politique agricole commune ou encore l'acceptabilité des OGM par les consommateurs et les producteurs s'exercent sur ce système et interfèrent avec le changement climatique. Le corpus d'hypothèses spécifiques a donc été complété par des hypothèses de contexte, issues des travaux de prospectives antérieurs sur la filière Vigne et vin. Par exemple, en recto « En Europe, l'espace agricole est l'objet d'une planification poussée où les terres les plus fertiles sont réservées aux cultures vivrières, la vigne étant cantonnée aux zones de moindre fertilité agronomique » et en verso « En Europe, l'espace agricole n'est pas l'objet d'une planification poussée, la vigne pouvant être plantée sur les terres les plus fertiles ». Ce travail a conduit à identifier et sélectionner *in fine* 70 hypothèses. Les liens (relations d'influence/dépendance) entre elles ont été recherchés, générant des agrégats d'hypothèses qui ont permis d'écrire les quatre chemins conduisant préférentiellement aux quatre stratégies d'adaptation prédéfinies envisageables (Aigrain et al., 2016a).

Les chemins vers les stratégies d'adaptation prédéfinies envisageables

Sous une forme très synthétique, chacun de ces quatre « chemins » peut être résumé comme suit.

Le chemin vers la stratégie conservatrice

Dans un contexte de pression des autorités sanitaires sur les boissons contenant de l'alcool et d'une gestion des terres et de l'eau en priorité destinées aux cultures alimentaires, la filière, peu liée avec la recherche, perçoit le changement climatique comme une menace. Sur la base d'un contenu culturel et paysager mis en avant pour bien différencier le vin d'une boisson seulement alcoolisée, les indications géographiques⁴⁸ (IG) et les régions qui les produisent constituent les îlots de résistance d'une viticulture qui se rétracte.

48. Les indications géographiques regroupent les appellations d'origine protégées (AOP) et les indications géographiques protégées (IGP).

Le chemin vers la stratégie innovante

Les enjeux environnementaux et sanitaires sont un moteur d'une évolution qui conduit à l'intégration d'un nombre croissant d'innovations en viticulture et en vinification. Cette évolution est autorisée dans un contexte favorable à une certaine stabilité des régions viticoles françaises et au développement d'une politique, d'une part, contraignante en matière de zonage agricole dans l'UE et, d'autre part, relativement libérale en matière de conditions d'élaboration des vins.

Le chemin vers la stratégie nomade

Dans un contexte marqué par une politique restrictive en matière d'alcool et par une recherche concentrée sur la réduction des intrants, les consommateurs, soucieux de retrouver le goût de l'origine de leurs vins, conduisent la filière Vigne et vin — dépourvue des connaissances nécessaires pour maintenir, même approximativement, la constance qualitative espérée — à « embarquer ailleurs » la notoriété des grandes appellations et à descendre en plaine chercher l'eau.

Le chemin vers la stratégie libérale

Dans un contexte plus libéral et assez favorable au marché du vin, les choix des nouveaux investisseurs, au niveau de la production et surtout du négoce, conduisent à un redéploiement de la viticulture entre des pôles irrigués, quelques anciens terroirs et de nouveaux vignobles bénéficiant du changement climatique. Des vins personnalisés ou des marques régionales se maintiennent, mais l'offre est majoritairement composée de vins technologiques contrôlés par quelques firmes d'aval. L'instabilité climatique, la concurrence entre vignobles, la dérégulation et la domination de quelques firmes finissent par fragiliser des entreprises viticoles désorganisées, qui ne peuvent bénéficier pleinement de la recherche et développement (R et D).

La version longue des présentations de ces chemins peut être retrouvée dans FranceAgriMer (2016) et Aigrain *et al.* (2016b).

Des forums en région pour mettre en débat la prospective et susciter des propositions d'action

Les prospectivistes de FranceAgriMer et de Montpellier SupAgro animateurs de l'exercice avaient développé, depuis 10 ans, des pratiques de restitution participative des exercices de prospective menés avec différentes filières agricoles, notamment Vigne et vins. Au vu de l'intérêt et de la faisabilité d'une mise en débat des scénarios, les centres INRAE et les interprofessions des bassins viticoles ont été sollicités pour réunir des acteurs liés à la filière, se sentant concernés par le changement climatique et disposés à contribuer à l'émergence de propositions d'action.

Il s'agissait d'abord d'informer les professionnels des travaux engagés à travers le projet Laccave en présentant à chaque fois le changement climatique, ses impacts observables ainsi que les recherches en cours pour l'adaptation. L'objectif était surtout de partager les scénarios imaginés, d'enregistrer la diversité des perceptions et positions, de réfléchir ensemble aux marges de manœuvre pour anticiper les futurs possibles ainsi décrits.

L'organisation de forums participatifs dans sept régions viticoles

Lors de sept forums participatifs organisés de novembre 2016 à mars 2019, dans les principales régions viticoles françaises (Alsace, Bordelais-Charentes et Sud-Ouest, Bourgogne et Beaujolais, Champagne, Languedoc-Roussillon, Vallée du Rhône et Provence, Val de Loire), les quatre scénarios d'adaptation, soient les quatre stratégies d'adaptation et les chemins qui y mènent, ont été présentés et discutés avec plus de 500 acteurs professionnels de la filière Vigne et vin. Les participants étaient issus de la production, de la R et D et du conseil, et enfin, de l'administration, du négoce ou d'autres activités, chacun de ces trois groupes représentant environ un tiers des participants.

Une même méthode a été mise en œuvre dans chaque région, en suivant quatre étapes :

1. Présentation par les organisateurs du contexte et des scénarios d'adaptation ;
2. Appropriation de ces informations par les participants répartis en groupes, pour discuter des enjeux et des conséquences de chaque chemin d'adaptation ;
3. Vote individuel sur chacun des scénarios d'adaptation, en choisissant parmi cinq attitudes stratégiques possibles, qui sont proactivité positive (agir dès maintenant pour favoriser l'advenue du scénario), proactivité négative (agir dès maintenant pour défavoriser l'advenue du scénario), réactivité anticipée (pour se préparer à l'advenue du scénario), veille (pour surveiller et voir venir), indifférence (ce scénario ne présente pas d'intérêt) ;
4. Proposition d'actions à mettre en œuvre, afin de favoriser ou défavoriser ces différents scénarios d'adaptation.

L'option préférentielle des acteurs : innover pour rester

Les résultats des votes (tableau II-7-1) sur les différents scénarios d'adaptation convergent entre les sept régions, même si des spécificités régionales ont été notées, puis analysées et mises en relation avec les caractéristiques climatiques et socioéconomiques des régions viticoles (Aigrain *et al.*, 2018 ; Ollat *et al.*, 2020). Par exemple, les acteurs du Val de Loire ont moins rejeté le scénario « conservateur » en voulant anticiper sa capacité de résilience possible, dans un contexte où le changement climatique est vu comme « un peu moins contraignant que pour d'autres régions » (Touzard *et al.*, 2020).

Tableau II-7-1. Les attitudes stratégiques choisies par les participants pour chaque scénario, en pourcentage des votes exprimés par les participants aux sept forums. Source : Touzard *et al.*, 2020.

Scénarios	Conservateur	Innovant	Nomade	Libéral
Proactivité positive	21 %	73 %	3 %	5 %
Proactivité négative	30 %	3 %	39 %	59 %
Réactivité anticipée	30 %	22 %	29 %	16 %
Veille	16 %	1 %	27 %	18 %
Indifférence	3 %	1 %	2 %	2 %

La synthèse nationale, comme les synthèses effectuées dans chacune des sept régions viticoles, montre que l'opinion majoritaire se porte sur l'idée d'emprunter le scénario innovant, mais avec quelles limites : « innover à tout prix » ou « innover pour rester » ?

Ce scénario peut être vu comme un moyen pour maintenir une viticulture organisée et liée aux terroirs. « Innover pour rester » consiste à préserver les investissements individuels et collectifs réalisés dans le territoire (patrimoine, image, autres activités, liens sociaux...), qui créent la valeur du vin.

Le scénario conservateur a généré le vote le plus hétérogène ; il traduit des perceptions variables sur la résilience des vignobles actuels, en fonction des régions (plus ou moins impactées et compétitives, Alsace et Champagne étant plus favorables), des catégories d'acteurs (viticulteurs plus favorables) et du niveau de satisfaction au regard de l'état actuel.

Le rejet du scénario nomade est motivé par la crainte d'un changement des conditions de concurrence entre vignobles et d'un effacement des terroirs et des paysages historiques, même si la typicité des vins devrait pouvoir être préservée grâce à la relocalisation des vignobles. Au-delà du rejet exprimé, ce scénario interroge surtout — « de nouveaux vignobles peuvent-ils réellement se développer ailleurs ? » — et doit être « surveillé ».

Le scénario libéral est plus clairement rejeté. Il est généralement considéré comme une menace, conduisant à un bouleversement des repères et à une perte d'influence des viticulteurs, notamment sur la chaîne de valeur en lien avec l'importance de la production française sous indication géographique.

Des propositions d'actions pour favoriser ou défavoriser les scénarios

Enfin, chacun des acteurs réunis était invité à proposer des actions de nature à favoriser ou défavoriser ces scénarios, ou encore à s'y préparer. Un corpus de 2700 propositions d'actions a ainsi été collecté, structuré *a posteriori* en quatre grands domaines : la recherche et l'expérimentation, les évolutions règlementaires, le soutien aux solutions locales, la formation et la communication.

L'analyse de ces contributions révèle qu'il n'existe pas de « solution unique » (p. ex. « tout cépage » ou « tout irrigation »), concernant les innovations techniques, les évolutions des organismes institutionnels, les actions individuelles et collectives. Les rôles prépondérants de la recherche et développement (R et D), d'une part, et de l'information à diffuser auprès des acteurs de la filière, d'autre part, sont fortement mis en avant. Des options variables pouvant inclure différents modèles vitivinicoles, et pouvant même coexister, ont été mises en évidence : par exemple, une viticulture en IGP très technologique et bénéficiant largement de l'irrigation, une viticulture en AOC innovante, régionale et locale, avec un fort développement de l'agroécologie et de l'agriculture biologique. Des variations apparaissent selon les régions, du fait d'impacts différenciés du changement climatique, de l'orientation produit ou de l'organisation régionale. Des liens sont établis avec d'autres enjeux : l'environnement, les attentes sociétales... Certaines questions demeurent peu abordées par les participants : les liens aux consommateurs, les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la gestion des risques...

De la coconstruction d'une stratégie nationale à l'action dans les régions viticoles

Parallèlement à la réalisation de ces forums dans les régions viticoles, la cellule d'animation de la prospective a organisé un passage de relais aux responsables professionnels nationaux. Au-delà d'une information dans les réseaux et médias liés au secteur, ce sont deux présentations de la démarche de prospective au Congrès mondial de la vigne et du vin⁴⁹ qui ont joué un rôle important (Aigrain *et al.*, 2016a et b). Les responsables de la filière française présents dans ces congrès ont exprimé un vif intérêt, avec la tenue d'une première rencontre entre eux et les pilotes de la prospective.

Le passage de relais aux organisations professionnelles et l'accompagnement pour l'élaboration d'un consensus

Un groupe de travail national a alors été mis en place sous l'égide de FranceAgriMer et de l'Inao. Ce groupe s'est réuni six fois entre décembre 2016 et fin 2018 pour prendre connaissance du travail, former et informer les principales organisations de la filière, et contribuer à la hiérarchisation des 2700 propositions issues des forums régionaux, selon à la fois leur caractère urgent et leur importance.

Les représentants des principales organisations viticoles nationales ont ainsi constitué un « groupe de pilotage politique » qui, lors de sa dernière réunion, fin 2018, a précisé les objectifs d'une stratégie nationale : « favoriser l'advenue du scénario innovant ; développer les actions à conduire pour éviter la réalisation du scénario nomade et du scénario libéral ; prendre en compte les différents votes sur le scénario conservateur ; s'appuyer pour cela sur tous les leviers disponibles : aspects règlementaires, communication et marketing, actions collectives, R et D et transfert vers les exploitations ». Ces orientations ont été validées par les instances représentatives de la filière (Comités nationaux AOC et IGP à l'Inao et Conseil spécialisé vin à FranceAgriMer). Il était attendu que la démarche d'élaboration de cette stratégie veille à la cohérence d'ensemble entre le niveau national et la prise en compte des attentes et spécificités régionales, telles qu'elles ressortaient des travaux du projet Laccave, et de l'exercice prospectif conduit en son sein en particulier. Cette stratégie devait permettre à la filière d'être plus réactive et plus efficace collectivement, et fournir un cadre explicatif argumenté à l'appui des différentes demandes d'évolution relatives aux aspects techniques, socioéconomiques ou règlementaires. Par ailleurs, elle visait à informer à la fois l'OIV, la Commission européenne et les autres États-membres sur la stratégie française, afin de favoriser leur compréhension de la démarche et de faciliter l'évolution de la réglementation dans la future Politique agricole commune. Elle devait permettre en outre une meilleure prise en compte du secteur vitivinicole dans le Plan national d'adaptation au changement climatique en cours d'élaboration par le ministère en charge de l'Agriculture (Hannin *et al.*, 2021 ; Aigrain *et al.*, 2022).

Un premier projet de stratégie nationale a donc été élaboré en 2018 et 2019 par le « groupe politique », avec l'appui du « groupe opérationnel », en reprenant de manière

49. Organisation internationale du secteur Vigne et vin, l'OIV est un organisme intergouvernemental à caractère scientifique et technique de compétence reconnu dans le domaine de la vigne, du vin, des boissons à base de vin, des raisins de table, des raisins secs et des autres produits issus de la vigne.

synthétique les propositions d'actions précédemment collectées et structurées autour de huit thèmes prioritaires pour agir. Ce projet a été présenté aux structures représentatives régionales (Conseils de bassins viticoles et Comités régionaux de l'Inao), en fin d'année 2019 (fig. II-7.3). Il s'agissait de recueillir leurs réactions mais également de recenser d'autres actions envisagées ou déjà mises en œuvre en région. Cette mécanique, relevant à la fois d'une approche *top down* (lignes directrices nationales) et *bottom-up* (retours des régions), a permis effectivement d'associer plus officiellement les organisations viticoles régionales, de prendre en compte les démarches déjà engagées ou imaginées dans les territoires, et d'envisager les adaptations régionales à intégrer en priorité dans le projet de stratégie nationale, compte tenu notamment des différentes expressions géographiques du changement climatique.

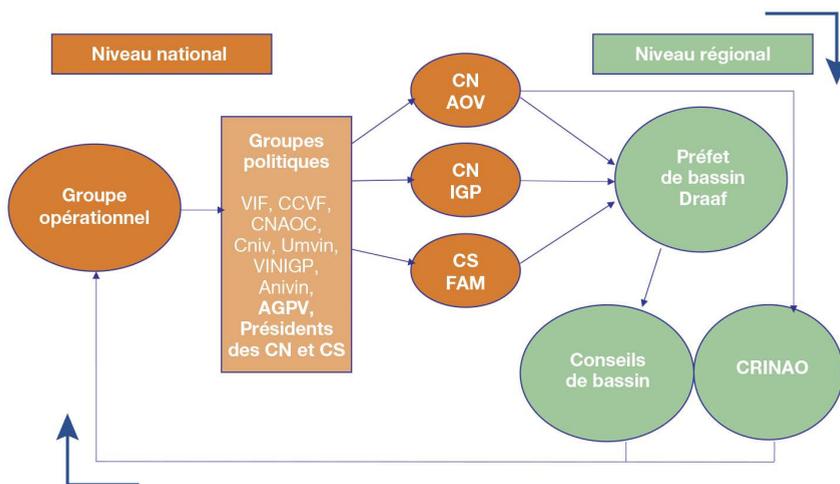


Figure II-7.3. Proposition d'une gouvernance de la stratégie climatique du secteur Vigne et vin.
Source : Aigrain et al., 2022.

VIF : Vignerons indépendants de France ; CCVF : Vignerons coopérateurs de France ; CNAOC : Confédération nationale des AOC viticoles ; Cniv, Umvin : Comité national des interprofessions des vins à appellation d'origine et à indication géographique ; Umvin : Union des maisons et marques de vin ; VINIGP : Confédération des vins IGP de France ; Anivin : Association nationale interprofessionnelle des vins de France ; AGPV : Association générale de la production viticole ; CN AOV : Comité national des appellations d'origine viticoles ; CN IGP : Comité national des indications géographiques protégées ; CS FAM : Conseil spécialisé de FranceAgriMer ; Draaf : Direction régionale de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt ; CRINAO : Comité régional de l'Inao.

Les retours de cette consultation ont été analysés par les chercheurs du projet Laccave, qui ont pu les mettre en regard des travaux de recherche menés dans les différents laboratoires. Ces retours ont également nourri le document final de stratégie remis au ministre de l'Agriculture par les représentants nationaux de la filière le 26 août 2021⁵⁰.

Du plan d'action à l'action, la balle est dans le camp professionnel !

La stratégie nationale proposée par les professionnels s'est finalement articulée autour de sept domaines : améliorer la connaissance des zones viticoles ; agir sur les conditions

50. Document Stratégie nationale à retrouver sur <https://www6.inrae.fr/Laccave/Prospective>.

de production; favoriser un matériel végétal adapté; agir sur les pratiques œnologiques; faire évoluer les marchés et garantir la production; promouvoir la recherche, le développement, le transfert et la formation; contribuer à l'atténuation du changement climatique. Ces domaines sont illustrés par 40 actions jugées prioritaires.

La traduction de cette stratégie en plan d'action est menée dans le cadre d'une convention signée en 2022 par les principales structures qui organisent et encadrent la filière française : Conseil spécialisé « Vin et cidre » de FranceAgriMer, Comités nationaux de l'Inao (AOC et IGP), Cniv, INRAE, IFV, ministère de l'Agriculture, Anivin, Umvin, Coop de France, Apca, Vignerons indépendants, Confédération des vins IGP, Régions de France, etc. L'animation des différents groupes de travail constitués dans cet objectif (comité de pilotage, comité de suivi, comité technique) a été confiée à l'IFV.

Il s'agit non seulement de réaliser un inventaire des résultats de recherche opérationnels mais surtout d'être en capacité, à l'échelle des bassins de production viticoles, d'en synthétiser les résultats sous forme de « packages de solutions », intégrant respectivement plusieurs innovations pour constituer autant de « modèles régionaux » résilients. Un plan R et D a ainsi été élaboré, pour animer et financer de nombreuses expérimentations en régions sur des thématiques liées à l'adaptation, sous la forme de « démonstrateurs régionaux ». Ce sont des lieux d'expérimentation des innovations, associant des producteurs et destinés à organiser le transfert des solutions pratiques d'adaptation et d'atténuation au changement climatique vers l'ensemble des parties prenantes de la filière Vigne et vin à l'échelle régionale. Cette démarche, qui s'appuie sur une approche globale et associe en amont les organisations professionnelles (ODG d'AOP et d'IGP) et interprofessionnelles, intègre quatre types d'actions :

- un inventaire et une évaluation des solutions;
- la mise en place des démonstrateurs régionaux et la structuration d'un réseau national de sites innovants;
- l'animation du réseau et la massification des pratiques;
- la coordination du projet et la communication.

Dans le domaine formation et recherche, l'IFV est chargé de bâtir un projet national structurant de R et D, conciliant adaptation et atténuation au changement climatique et intégrant les attentes spécifiques des différentes régions viticoles.

Cette dynamique a par ailleurs déjà conduit à une proposition de modification de la réglementation sur l'irrigation (nouveau décret n° 2023-735 du 8/08/2023, cf. chapitre I-7) et à l'élaboration par l'Inao d'un dispositif facilitant l'expérimentation de nouvelles variétés à des fins d'adaptation pour les vins AOC et IGP. L'objectif est que cette dynamique nationale soit coordonnée avec l'échelle régionale, via les interprofessions, mais aussi via les structures hors appellations et au bénéfice de toute la filière.

Conclusion

L'étude prospective conduite par un groupe d'experts d'INRAE, de Montpellier SupAgro, d'universités, de l'Inao et de FranceAgriMer, dans le cadre du projet Laccave, a débuté par la rédaction de quatre stratégies d'adaptation préétablies envisageables. Elle s'est poursuivie par la construction de quatre chemins qui y conduisent respectivement, en

identifiant un ensemble d'hypothèses motrices sur l'évolution du système Vigne et vin. Les scénarios ainsi élaborés ont été soumis à 500 acteurs de la filière dans sept régions viticoles, pour les analyser et s'entendre sur l'attitude stratégique préférentielle à retenir pour chacun d'eux : notamment s'y préparer, le favoriser ou le défavoriser. L'élaboration d'une base de données sur les attitudes stratégiques des participants à ces forums et de leurs propositions d'actions a permis à ce groupe d'« experts » de fournir, aux responsables professionnels nationaux, de grandes directions et une méthodologie pour concevoir une stratégie nationale d'adaptation. Présentée au ministre de l'Agriculture en août 2021, cette stratégie est actuellement déclinée en plan d'action, avec l'objectif d'articuler les niveaux nationaux et régionaux. L'ensemble du processus a été conduit sur environ huit ans.

L'approche initialement retenue d'outiller l'interdisciplinarité au sein d'un projet de recherche était déjà ambitieuse. Sur le plan scientifique, elle a bien permis d'engager et nourrir un dialogue interdisciplinaire entre chercheurs et de construire un questionnement plus systémique. De plus, la méthode d'élaboration des scénarios, à partir de stratégies préétablies bien contrastées, s'est montrée efficace pour concevoir des futurs possibles pour un secteur agricole dans le contexte du changement climatique. Elle a également donné des résultats très concrets et applicables, permis de mobiliser la filière professionnelle et de la mettre en mouvement.

L'utilisation de la prospective par la filière Vigne et vin française pour l'élaboration de sa stratégie a connu un rayonnement national et international. Le travail a été présenté au Congrès mondial de la vigne et du vin de Punta del Este (Aigrain *et al.*, 2018), au groupe Vin du Copa-Cogeca en mai 2019 et à de nombreux colloques internationaux. En France, d'autres filières ont souhaité aborder la question de l'adaptation au changement climatique par cette voie : Forêt-bois à la demande du CNPF (Centre national de la propriété forestière), Grandes cultures à la demande du conseil spécialisé de FranceAgriMer. La filière IG-Laitière a également exprimé un intérêt pour ce travail. Actuellement, un autre projet scientifique d'envergure visant à cultiver la vigne sans pesticides (PPR-Vitae) met en œuvre une démarche prospective analogue, en tirant parti des enseignements de l'exercice réussi dans le cadre de Laccave.

Néanmoins, la lenteur du processus — depuis la construction de l'interdisciplinarité entre scientifiques à partir de 2012, la mise en débat des scénarios à partir de 2016, la remise officielle du plan d'action au ministre de l'Agriculture en 2021 qui n'est que l'amorce de la mise en œuvre de solutions — démontre que l'adaptation au changement climatique, comme toute dynamique de changement, se heurte à des verrous sociotechniques et politiques, ainsi qu'à des jeux d'acteurs qui influencent le processus. La dispersion des attitudes stratégiques exprimées lors des forums de restitution de l'exercice prospectif vis-à-vis du scénario conservateur, et, dans une moindre mesure, du scénario nomade, en est une illustration. La structuration de la filière largement fondée sur les indications géographiques, sur la valeur des vignes et celle des vins qui en sont issus, fait de chaque décision un sujet à la fois individuel et collectif. Mais en ouvrant des espaces de débat, en représentant différents futurs possibles qui ne peuvent laisser indifférents, en mettant en évidence les marges de manœuvre et les possibilités d'actions, nous aurons peut-être contribué à endiguer l'écoanxiété naissante des acteurs de la filière Vigne et vin et à ouvrir certaines lignes directrices pour l'action collective...

Conclusion générale

Nathalie Ollat et Jean-Marc Touzard

La vigne, le vin, le changement climatique... Pour explorer ce nouveau domaine de recherche, cet ouvrage a rassemblé les contributions de chercheurs et de leurs partenaires, qui se sont engagés pendant dix ans dans une collaboration scientifique fertile et passionnée autour des projets Laccave, puis Laccave 2.21, soutenus par INRAE. Les 16 chapitres ont présenté des résultats de ce projet, mais plus largement des synthèses actualisées pour mieux connaître les impacts du changement climatique sur la vigne et le vin, étudier les leviers d'adaptation et coconstruire des stratégies à différentes échelles, depuis l'exploitation viticole jusqu'à la politique nationale. L'ouvrage apporte des connaissances nouvelles, croisant les regards de différentes disciplines, pour contribuer directement aux capacités d'adaptation des acteurs de la filière Vigne et vin. Cette volonté de participer aux processus mêmes d'adaptation a poussé les participants du projet Laccave et contributeurs de l'ouvrage à formuler une série de messages clés, appelant à une cogestion adaptative des vignobles, et à poursuivre une nouvelle manière de faire de la recherche, transdisciplinaire et transformative.

La coconstruction de messages clés pour les acteurs de la filière

À l'occasion du séminaire de clôture du projet Laccave 2.21, les 24-26 novembre 2021, les chercheurs et leurs partenaires ont en effet tenu à construire, de manière participative, des messages à destination des acteurs de la filière Vigne et vin, des responsables politiques et plus largement de la société. En partant de synthèses thématiques, des premiers messages ont été proposés, puis enrichis et sélectionnés lors d'ateliers, et confrontés aux réactions de viticulteurs à l'occasion du salon Sitevi⁵¹ qui suivait ce séminaire. Cette démarche originale de formulation participative de messages a conduit à la rédaction d'un communiqué de presse, repris ensuite par de nombreux médias⁵². Deux ans plus tard, ces messages restent pertinents et d'actualité, accentués sans doute par les effets toujours plus marqués du changement climatique sur la filière.

51. Salon international des équipements et savoir-faire pour les productions vigne-vin, olive, fruits-légumes.

52. En particulier un article dans *Le Monde* du 16 décembre 2021, « Climat : les pistes du projet Laccave pour sauver les vignes », mais aussi dans *Le Paysan du Midi*, *Vitisphère*, ou reprises ultérieures par France Inter, *Financial Times*, CBS...

Le premier message est une alerte sérieuse. Il convient de réaffirmer que les impacts du changement climatique s'intensifient dans les vignobles. Ils bouleversent le fonctionnement de la vigne et de ses écosystèmes, avec des effets en cascade sur les caractéristiques des vins, l'évolution des filières et marchés, la géographie de la vigne, les risques et la viabilité de nombreuses entreprises...

Pour autant, des solutions pour l'adaptation sont possibles, si l'augmentation de la température moyenne est contenue autour de 2°C et si la mobilisation conjointe des acteurs de la filière, des pouvoirs publics et de la recherche se poursuit. Les leviers d'adaptation sont multiples et leur expérimentation doit donc s'accélérer. Les participants au projet Laccave ont pour cela retenu huit autres messages, ciblés sur ces leviers :

1. La conservation et l'amélioration des sols viticoles apparaît comme une urgence pour favoriser la résilience des vignobles, en combinant enherbement maîtrisé, apport de matière organique (compost, broyats, écopâturage...), aménagements anti-érosion...
2. Le renouvellement et la diversification du matériel végétal est aussi une option majeure, permettant de planter des couples cépage/porte-greffe plus tardifs, résistants à la sécheresse ou à des températures plus élevées, produisant moins de sucre ou plus d'acides. Cette option concerne des variétés « anciennes » ou cultivées dans d'autres régions, mais aussi les créations variétales. Pour cela, les collections et conservatoires, essais individuels ou collectifs, réseaux d'observation doivent être soutenus et coordonnés pour favoriser le partage d'information ;
3. La gestion de l'eau doit être raisonnée à l'échelle du territoire et de manière systémique, selon le type de vin, l'encépagement et les pratiques viticoles, mais en jouant aussi sur la gestion des sols qui régulent la circulation de l'eau et sa recharge issue des pluies d'automne et d'hiver. Une irrigation de précision permet sans doute de piloter l'état hydrique des vignes, mais sa généralisation n'est ni possible ni souhaitable. Il convient de promouvoir des pratiques agroécologiques et économes en eau. De fait, il faut privilégier des itinéraires techniques qui permettent de maintenir une grande partie des vignobles sans irrigation ;
4. Il existe déjà des moyens d'adapter la vinification pour limiter les effets du changement climatique (levures adaptées, réduction de la teneur en alcool, ajustement de l'acidité...), mais des recherches systémiques et appliquées aux nouvelles variétés restent nécessaires ;
5. L'hétérogénéité spatiale au sein d'une petite région viticole est une ressource pour l'adaptation, ce qui suppose de nouvelles connaissances, cartographies, simulations. La gestion locale des incendies, des écosystèmes et des paysages appelle à une gouvernance viticole ouverte aux autres acteurs du territoire. Le changement climatique invite ainsi à une nouvelle ingénierie des territoires viticoles ;
6. Les risques climatiques bouleversent les stratégies économiques. Les assurances privées doivent être associées à un soutien et à des investissements publics ou mutualisés, à la prévention, à des systèmes d'information et d'alerte encore plus performants, aux options de gestion de réserves et des marchés du vin...
7. La prise en compte des consommateurs est indispensable pour connaître leurs préférences face à l'évolution des vins ou aux innovations de l'adaptation, mais aussi pour les sensibiliser et les impliquer dans les stratégies à mettre en œuvre pour faire face au changement climatique ;

8. La filière doit contribuer à l'atténuation du changement climatique en réduisant ses émissions et en capturant du carbone, car les opportunités sont nombreuses (gestion des sols et paysages, logistique, isolation...) et les consommateurs sont sensibles à cet engagement qui contribue à l'image du vin.

Enfin, un dernier message, intégrateur, peut être retenu : le projet Laccave a mis en évidence la nécessité de concevoir et d'évaluer les combinaisons de ces différents leviers d'adaptation, en mobilisant des démarches systémiques et participatives pour construire des stratégies à différentes échelles d'action : exploitation, bassin versant, vignoble régional, filière nationale où la stratégie d'adaptation élaborée sur la base de ce projet est mise en œuvre...

Vers une cogestion adaptative des vignobles, à plusieurs échelles

De fait, « construire et mettre en cohérence des stratégies d'adaptation à différentes échelles » est devenu progressivement une question de recherche majeure dans le projet Laccave puis Laccave 2.21, comme le montrent les chapitres de la seconde partie de cet ouvrage. Mais au-delà de vouloir produire des connaissances scientifiques utiles pour l'action, les participants à ce projet ont contribué à formuler une nouvelle perspective de gestion pour le secteur de la vigne et du vin : aller vers une cogestion adaptative des vignobles, de leurs territoires et de leurs vins. Cette proposition reprend les résultats de recherche sur la gestion des systèmes socioécologiques face au changement climatique (Plummer, 2013 ; IPCC, 2022). Elle résulte aussi, de manière pragmatique, des travaux de prospective conduits dans Laccave, et dont les résultats ont été enrichis à travers les forums participatifs de sept régions viticoles, puis mobilisés pour coconstruire la stratégie nationale d'adaptation (chapitre II.7).

La perspective d'une cogestion adaptative s'est en effet affirmée progressivement à travers l'exploration de différentes voies d'adaptation, et en pointant leurs enjeux et conséquences. Ne rien faire, et s'appuyer sur les seules promesses de la nature et des traditions, n'est pas envisageable, car cela revient à subir les impacts de plus en plus importants du changement climatique. Compter sur des ajustements de pratiques et d'encépagements dans le cadre des règles actuelles du secteur ne semble pas non plus suffisant face à l'accélération du changement climatique. Miser à l'inverse sur un déplacement massif des vignobles pour retrouver ailleurs des conditions climatiques favorables paraît impossible politiquement et socialement, et présente de nombreuses incertitudes. Accepter une régulation libérale, fondée sur les promesses du marché et des innovations technologiques, bouleverserait totalement la filière et est clairement rejeté par les acteurs (Touzard *et al.*, 2021)... Par contre, accélérer l'innovation pour maintenir la viticulture dans ses terroirs est une option privilégiée dans toutes les régions, mais en ayant conscience qu'une artificialisation trop forte des systèmes risquerait de rompre les liens entre le vin et son territoire... C'est en cherchant à préciser cette dernière voie d'adaptation que la cogestion adaptative peut être proposée.

La gestion adaptative d'un vignoble, de son territoire et de ses vins peut se définir comme un processus itératif (ou circulaire) d'exploration, de mise en œuvre, de suivi-

évaluation et de révision de solutions (matériel végétal, pratiques techniques et œnologique, gestion des ressources locales, actions de communication et d'organisation dans la filière...) pour développer une viticulture durable et résiliente face au changement climatique (Boyer et Touzard, 2022). Elle s'appuie, à une échelle locale ou régionale, sur une démarche collective, qui peut être animée par exemple par l'ODG (organisme de gestion) d'une appellation, ouverte aux acteurs concernés par la gestion des ressources locales nécessaires à l'adaptation (sol, écosystème, paysage, eau...), mais aussi aux consommateurs. Ce processus se renforce par une dynamique d'expérimentation et d'apprentissage en continu, favorisant la résilience des systèmes viticoles. Son développement est lié à une série de conditions et d'actions, souvent déjà envisagées ou engagées :

- la redéfinition des principes des indications géographiques AOP ou IGP, qui peuvent continuer à garantir une qualité spécifique liée à un territoire, mais susceptible d'évoluer et qui doit exprimer avant tout la garantie d'une cogestion adaptative (et durable) des ressources de ce territoire ;
- des cahiers des charges plus flexibles, incluant plus de pratiques liées à l'environnement et à l'atténuation du changement climatique, une orientation déjà prise par l'Inao avec la possibilité d'introduire des variétés d'intérêt pour l'adaptation, ou de tester des innovations ;
- le développement de formations pour les viticulteurs et acteurs de la filière, et d'une « nouvelle ingénierie des terroirs », associant des compétences de diagnostic, d'analyse spatiale, de simulation climatique, d'expérimentation, de gestion adaptative et participative des ressources locales...
- une évolution des politiques publiques, reconnaissant les contributions de l'agriculture et de la viticulture, et accompagnant, soutenant, les innovations et démarches associées à la cogestion adaptative des vignobles.

L'expérience d'une recherche transdisciplinaire, transformative et médiatique

Cette perspective d'une cogestion adaptative des vignobles dépend aussi de l'implication des chercheurs, appelant à une nouvelle génération de recherches partenariales et participatives sur la vigne et le vin. Cette « nouvelle » manière de faire de la recherche a précisément été expérimentée de manière pragmatique dans le projet Laccave et elle irrigue tous les chapitres de cet ouvrage. Vouloir étudier et accompagner les processus d'adaptation au changement climatique dans cette filière a en effet amené les chercheurs à s'engager dans un nouveau régime de production de connaissances scientifiques, transdisciplinaire, transformatif et médiatique.

La complexité des impacts du changement climatique, les nombreux domaines et dimensions d'analyse des solutions pour l'adaptation, leurs combinaisons à différentes échelles spatiales et temporelles pour concevoir des stratégies... ont précisément poussé des chercheurs de disciplines et de laboratoires différents à travailler ensemble sur la vigne et le vin, et à produire des connaissances interdisciplinaires et systémiques. Les sollicitations croissantes des acteurs d'une filière bien organisée et de plus en plus concernée par l'accélération du changement climatique ont en même temps conduit les chercheurs à associer ces acteurs à leurs projets et à s'engager ensemble dans des réflexions, des débats et

des actions visant à transformer les activités vitivinicoles et leur gestion à l'échelle territoriale ou sectorielle. Mais au-delà de ces démarches participatives avec des acteurs de la filière, la place particulière du vin dans la société française a aussi conduit les chercheurs à réaliser des documents ou vidéos à destination d'un public plus large, à participer à de nombreuses actions de communication dans les médias... La vigne et le vin sont ainsi devenus un moyen pour sensibiliser les citoyens aux impacts du changement climatique et aux enjeux de l'atténuation et de l'adaptation. Même si la question de l'atténuation n'était pas traitée dans le projet Laccave, et est peu considérée dans cet ouvrage, les chercheurs et leurs partenaires ont aussi affirmé l'importance de la combiner avec la question de l'adaptation. Pour maintenir plus de marges de manœuvre pour s'adapter, il faut tout faire pour que le climat se stabilise en dessous de +2°C, un réchauffement qui paraît encore compatible avec la cogestion adaptative d'une « viticulture de terroir ».

Cette évolution a été favorisée par les nouvelles orientations d'INRAE promouvant les sciences et recherches participatives et par l'appui sur dix ans de son métaprogramme Accaf. Elle a aussi été influencée par l'évolution du contexte sociopolitique général, exprimant l'urgence de l'action climatique (COP21 Paris) et se référant aux scientifiques pour argumenter et construire de nouvelles politiques, même si les mesures mises en œuvre restent encore trop limitées... Mais ce sont surtout les initiatives, les engagements et les actions collectives initiés par les chercheurs eux-mêmes à l'échelle d'un projet comme Laccave qui ont compté !

Cet ouvrage exprime donc un parcours d'adaptation des chercheurs avec leurs partenaires, faisant évoluer leurs activités, leurs métiers et contributions : produire des connaissances scientifiques sur des processus (impact et adaptation) à partir d'observations et de modélisations ; fournir des expertises à partir de ces connaissances ; élaborer de nouvelles méthodes participatives ; devenir lanceurs d'alerte, communicateurs et débatteurs ; coconstruire des solutions et appuyer les politiques publiques ; ouvrir des espaces d'expérimentation sociale pour la transformation des systèmes viticoles...

Mais ce parcours vers une science transformative (Fedele et al., 2019) n'est qu'une étape dans le développement de connaissances pour l'adaptation au changement climatique. Les questions ouvertes par les contributions de cet ouvrage sont si nombreuses ! Il convient évidemment de poursuivre les travaux sur les impacts, notamment à l'échelle fine de la vigne, des terroirs, ou sur les multiples effets en interaction dans les écosystèmes et paysages de la vigne. L'exploration et l'analyse de solutions doivent être étendues en intégrant de nouveaux domaines, des options qui combinent par exemple des innovations agroécologiques et numériques, biotechnologiques ou robotiques. La gestion des risques et la prise en compte des événements extrêmes est une question encore peu traitée pour la viticulture et qui devient cruciale. La question de l'évaluation (multicritère, environnementale, économique) des solutions et surtout de leurs combinaisons dans des chemins d'adaptation reste un chantier majeur. Plus largement, les conditions de développement d'une cogestion adaptative des vignobles et de leurs filières (incluant expérimentation et évaluations de systèmes innovants) est à mettre au cœur de nouvelles recherches conduites à l'échelle de territoires, et qu'il convient de comparer et confronter à l'échelle nationale et internationale.

La dimension internationale est en effet fondamentale et constitue une des perspectives majeures de cet ouvrage. Les travaux présentés dans ces chapitres concernent les

vignobles français et leurs filières. La France, par le poids de ce secteur, la diversité de ses vignobles et de ses vins, et l'importance de son dispositif de recherche et de ses partenaires, constitue un véritable *living lab* pour étudier l'adaptation, avec potentiellement une portée générique et internationale, prolongeant le rayonnement historique de la France sur le monde du vin, son enseignement et ses recherches. Le changement climatique frappe en effet tous les vignobles dans le monde (chapitre II-1), avec une diversité encore plus importante d'initiatives, de projets et de collaborations possibles. Des projets européens et internationaux impliquent déjà les auteurs de cet ouvrage, des présentations nombreuses de ces résultats ont eu lieu dans des colloques internationaux ou dans le cadre de l'OIV, les collaborations scientifiques se renforcent... Cet ouvrage voudrait ainsi être une base pour opérer un changement d'échelle en appelant à un programme de recherche international interdisciplinaire, poursuivant les travaux et méthodes développés dans Laccave et présentés ici. Le changement climatique est global, la vigne et le vin se sont aussi « globalisés », mais en valorisant des qualités qui expriment des spécificités locales... Les réponses adaptatives vont aussi se jouer à travers un renforcement des coopérations et des actions à l'échelle globale, si l'on veut poursuivre l'histoire de cette plante et de cette boisson qui expriment et enrichissent une partie de la culture et des plaisirs des sociétés humaines.

Bibliographie

- Abiven S., Menasseri S., Chenu C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – a literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41 (1), 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>.
- Agrete, 2020. Pratiques phytosanitaires en viticulture : campagne 2016, Paris, ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 23 p. (Chiffres et données).
- Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Hannin H., Ollat N., Touzard J.-M., 2021. *Quelles actions pour la filière vigne et vin face au changement climatique ? Sélection de propositions issues d'une démarche participative et de la consultation d'instances professionnelles viticoles*, INRAE, 25 p., <https://doi.org/10.15454/ahd9-e468>.
- Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Hannin H., Ollat N., Touzard J.-M., 2022. La fabrique d'une stratégie nationale viti-vinicole d'adaptation au changement climatique. In : *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique* (L. Michel, E. Brun, eds.), La documentation française, ONERC, Paris, 272-288.
- Aigrain P., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Giraud-Héraud E., Hannin H., Ollat N., Touzard J.-M., 2016a. Adaptation au changement climatique : intérêt d'une démarche prospective. *BIO Web of Conferences*, 7, <http://doi.org/10.1051/bioconf/20160703015>.
- Aigrain P., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Giraud-Héraud E., Hannin H., Ollat N., Touzard J.-M., 2016b. Travaux de prospective sur l'adaptation de la viticulture au changement climatique : quelles séries d'événements pourraient favoriser différentes stratégies d'adaptation ? *BIO Web of Conferences*, 7, <http://doi.org/10.1051/bioconf/20160703016>.
- Aigrain P., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Giraud-Héraud E., Hannin H., Ollat N., Touzard J.-M., 2019. L'utilisation par la viticulture française d'un exercice de prospective pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation au changement climatique. *BIO Web of Conferences*, 12, <http://doi.org/10.1051/bioconf/20191203020>.
- Aigrain P., Brugière F., Duchêne E., Gautier J., Giraud Héraud E., Hannin H., Garcia de Cortazar I., Ollat N., Touzard J.-M., 2016c. *Une prospective pour le secteur vigne et vin dans le contexte du changement climatique*, Les synthèses de FranceAgrimer, Paris.
- Aigrain P., Brugière F., Hannin H., 2023. *Prospective filière française vignes et vin 2040-2045*, Les études de FranceAgrimer, Paris, 263 p.
- Albasha R., Fournier C., Pradal C., Chelle M., Prieto J.A., Louarn G., Simonneau T., Lebon E., 2019. HydroShoot: a functional-structural plant model for simulating hydraulic structure, gas and energy exchange dynamics of complex plant canopies under water deficit-application to grapevine (*Vitis vinifera*). In *Silico Plants*, 1 (1), <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diz007>.
- Alem H., Ojeda H., Rigou P., Schneider R., Torregrosa L., 2021. The reduction of plant sink/source does not systematically improve the metabolic composition of *Vitis vinifera* white fruit. *Food Chemistry*, 345, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128825>.
- Alexandratos N., Bruinsma J., 2012. *World Agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision*, ESA Working paper, FAO, Rome.
- Alikadic A., Pertot I., Eccel E., Dolci C., Zarbo C., Caffarra A., De Filippi R., Furlanello C., 2019. The impact of climate change on grapevine phenology and the influence of altitude: a regional study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 73-82, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.030>.
- Allain S., Plumecocq G., Leenhardt D., 2020. Linking deliberative evaluation with integrated assessment and modelling: a methodological framework and its application to agricultural water management. *Futures*, 120, <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102566>.
- Allamy L., Darriet P., Pons A., 2018. Molecular interpretation of dried-fruit aromas in Merlot and Cabernet Sauvignon musts and young wines: impact of over-ripening. *Food Chemistry*, 266, 245-253, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.02.030>.
- Allen M.S., Lancey M.J., Harris R.L.N., Brown N.V., 1991. Contribution of methoxypyrazines to Sauvignon blanc aroma. *American Journal of Enology and Viticulture*, 42 (2), 109-112, <https://doi.org/10.5344/ajev.1991.42.2.109>.

- Alletto L., Cueff S., Bréchemier J., Lachaussée M., Derrouch D., Page A., Gleizes B., Perrin P., Bustillo V., 2022. Physical properties of soils under conservation agriculture: a multi-site experiment on five soil types in south-western France. *Geoderma*, 428, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116228>.
- Ambiaud E., 2012. Moins de désherbants dans les vignes. *Agreste primeur*, 288.
- Amrani Joutei K., Glories Y., Mercier M., 1994. Localisation des tannins dans les pellicules de raisin. *Vitis*, 33, 133-138.
- Archer E., Strauss H.C., 1985. Effect of plant density on root distribution of three-year-old grafted 99 Richter grapevines. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 6 (2), 25-30, <https://doi.org/10.21548/6-2-2347>.
- Arias L.A., Berli F., Fontana A., Bottini R., Piccoli P., 2022. Climate change effects on grapevine physiology and biochemistry: benefits and challenges of high altitude as an adaptation strategy. *Frontiers in Plant Science*, 13, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.835425>.
- Ascoli D., Moris J.V., Marchetti M., Sallustio L., 2021. Land use change towards forests and wooded land correlates with large and frequent wildfires in Italy. *Annals of Silvicultural Research*, 46 (2), 177-188, <https://doi.org/10.12899/asr-2264>.
- Aubertot J.-N., Robin M.-H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping practices, and the abiotic and biotic environment. I. Conceptual bases. *PLoS One*, 8 (9), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073202>.
- Autret B., Mary B., Chenu C., Balabane M., Girardin C., Bertrand M., Beaudoin N., 2016. Alternative arable cropping systems: a key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 232, 150-164, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008>.
- Autret B., Mary B., Strullu L., Chlebowski F., Mäder P., Mayer J., Olesen J.E., Beaudoin N., 2020. Long-term modelling of crop yield, nitrogen losses and GHG balance in organic cropping systems. *Science of the Total Environment*, 710, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134597>.
- Baeza P., Sánchez-de-Miguel P., Centeno A., Junquera P., Linares R., Lissarrague J.R., 2007. Water relations between leaf water potential, photosynthesis and agronomic vine response as a tool for establishing thresholds in irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae*, 114 (3), 151-158, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.06.012>.
- Baize D., 2004. *Petit Lexique de pédologie*, Paris, Inra éditions, 271 p.
- Barbeau C., Barbeau G.E., Joannon A., 2014. Analyzing the sensitivity of viticultural practices to weather variability in a climate change perspective: an application to workable-day modelling. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 48 (2), 141-152, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.2.1563>.
- Barbeau G., Neethling E., Ollat N., Quénot H., Touzard J.-M., 2015. Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *Agronomie environnement et sociétés*, 5 (1), 67-75.
- Barham E., 2018. Translating terroir: the global challenge of French AOC labeling. *Journal of Rural Studies*, 19 (1), 127-138, [https://doi.org/10.1016/S0743-0167\(02\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0743-0167(02)00052-9).
- Bartoli P., Boulet D., 1989. Dynamique et régulation de la sphère agroalimentaire : l'exemple de la sphère viticole, thèse d'État, Université Montpellier I, 910 p.
- Battaglini A., Barbeau G., Bindi M., Badeck F.W., 2009. European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change*, 9, 61-73, <https://doi.org/10.1007/s10113-008-0053-9>.
- Bécart V., Lacroix R., Puech C., García de Cortázar-Atauri I., 2022. Assessment of changes in Grenache grapevine maturity in a Mediterranean context over the last half-century. *OENO One*, 56 (1), 53-72, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.1.4727>.
- Becker G., DeGroot M., Marschak J., 1964. Measuring utility by a single response sequential method. *Behavioural Science*, 9, 226-232, <https://doi.org/10.1002/bs.3830090304>.
- Berdeja M., Hilbert G., Dai Z.W., Lafontaine M., Stoll M., Schultz H.R., Delrot S., 2014. Effect of water stress and rootstock genotype on Pinot Noir berry composition. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20 (3), 409-421, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12091>.
- Bergez J.-E., Audouin E., Therond O., 2019. *Agroecological Transitions: from theory to practice in local participatory design*, Cham, Springer Nature Switzerland AG, 335 p.
- 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. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52 (1), <https://doi.org/10.5344/ajev.2001.52.1.1>.

- Bernacchi C.J., Singass E.L., Pimentel C., Portis A.R., Long S.P., 2001. Improved temperature response functions for models of Rubisco-limited photosynthesis. *Plant, Cell & Environment*, 24 (2), 253-259, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2001.00668.x>.
- Bertrand F., Thermes C., La Jeunesse I., 2020. Stratégies d'adaptation au changement climatique à court et long terme : quelles actions pour les viticulteurs en région Centre-Val de Loire. *Norois*, 254, 59-73, <https://doi.org/10.4000/norois.9638>.
- Biddoccu M., Ferraris S., Pitacco A., Cavallo E., 2017. Temporal variability of soil management effects on soil hydrological properties, runoff and erosion at the field scale in a hill-slope vineyard, north-west Italy. *Soil and Tillage Research*, 165, 46-58, <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.017>.
- Bigard A., Berhe D.T., Maoddi E., Sire Y., Boursiquot J.M., Ojeda H., Péros J.P., Doligez A., Romieu C., Torregrosa L., 2018. *Vitis vinifera* L. fruit diversity to breed varieties anticipating climate changes. *Frontiers in Plant Science*, 9, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00455>.
- Bigard A., Romieu C., Ojeda H., Torregrosa L., 2022. The sugarless grape trait characterised by single berry phenotyping. *OENO One*, 56 (3), 89-102, <https://doi.org/10.1101/2022.03.29.486323>.
- Bindi M., Fibbi L., 2000a. Modelling climate change impacts at the site scale on grapevine. In: *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe. An Integrated Assessment* (T.E. Downing, P.A. Harrison, R.E. Butterfield, K.G. Lonsdale, eds.), Environmental Change Institute, Oxford, 117-134.
- Bindi M., Fibbi L., Maselli F., Miglietta F., 2000b. Modelling climate change impacts on grapevine in Tuscany. In: *Climate Change, Climatic Variability and Agriculture in Europe. An Integrated Assessment* (T.E. Downing, P.A. Harrison, R.E. Butterfield, K.G. Lonsdale, eds.), Environmental Change Institute, Oxford, 191-216.
- Blum W.E.H., 1998. Les différentes fonctions du sol. In: *Sols et sociétés. Regards pluriculturels* (R. Lahmar, J.-P. Ribaut, eds.), Charles Léopold Mayer, Paris, 11-14.
- Bois B., Gavrilesco C., Zito S., Richard Y., Castel T., 2023. Uncertain changes to spring frost risks in vineyards in the 21st century. *Ives Technical Reviews*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7514>.
- Bois B., Joly D., Quénel H., Pieri P., Gaudillière J.-P., Guyon D., Saur E., Van Leeuwen C., 2018. Temperature-based zoning of the Bordeaux wine region. *OENO One*, 52 (4), 291-306, <https://doi.org/10.20870/oenone.2018.52.4.1580>.
- Bois B., Moriondo M., Jones G.V., 2014. Thermal risk assessment for viticulture using monthly temperature data. In: *10th International Terroir Congress – Proceedings, 7-10 juillet, Tokaj, Corvinus University, Budapest*, <https://ives-openscience.eu/5204>.
- Bois B., Pauthier B., Brillante L., Mathieu O., Leveque J., Van Leeuwen C., Castel T., Richard Y., 2020. Sensitivity of grapevine soil-water balance to rainfall spatial variability at local scale level. *Frontiers in Environmental Science*, 8, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00110>.
- Bois B., Pieri P., Van Leeuwen C., Wald L., Huard F., Gaudillière J.-P., Saur E., 2008. Using remotely sensed solar radiation data for reference evapotranspiration estimation at a daily time step. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (4), 619-630, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.005>.
- Bois B., Wald L., Pieri P., Van Leeuwen C., Commagnac L., Chery P., Christen M., Gaudillière J.-P., Saur E., 2008. Estimating spatial and temporal variations in solar radiation within Bordeaux winegrowing region using remotely sensed data. *Journal international des sciences de la vigne et du vin*, 42 (1), 15-25, <https://doi.org/10.20870/oenone.2008.42.1.829>.
- Bois B., Zito S., Calonnec A., 2017. Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: the first results of a global survey. *Oeno One*, 51 (2), 133-139, <https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.2.1780>.
- Bonada M., Sadras V., Moran M., Fuentes S., 2013. Elevated temperature and water stress accelerate mesocarp cell death and shrivelling, and decouple sensory traits in Shiraz berries. *Irrigation Science*, 31 (6), 1317-1331, <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0407-z>.
- Bonada M., Sadras V.O., 2015. Review: critical appraisal of methods to investigate the effect of temperature on grapevine berry composition. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21 (1), 1-17, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12102>.
- Bonnefoy C., Quenol H., Bonnardot V., Barbeau G., Madelin M., Planchon O., Neethling E., 2013. Temporal and spatial analyses of temperature in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, 33 (8), 1849-1862, <https://doi.org/10.1002/joc.3552>.
- Bopp M.-C., Kazakou E., Metay A., Fried G., 2022. Relative importance of region, seasonality and weed management practice effects on the functional structure of weed communities in French vineyards. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107892>.

- Borrelli P., Robinson D.A., Fleischer L.R., Lugato E., Ballabio C., Alewell C., Meusburger K., Modugno S., Schütt B., Ferro V., Bagarello V., Oost K.V., Montanarella L., Panagos P., 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communication*, 8 (1), <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>.
- Borrelli P., Robinson D.A., Panagos P., Lugato E., Yang J.E., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L., Ballabio C., 2020. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117 (36), 21994-22001, <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>.
- Bortolami G., Gambetta G.A., Cassan C., Dayer S., Farolfi E., Ferrer N., Gibon Y., Jolivet J., Lecomte P., Delmas C.E., 2021. Grapevines under drought do not express esca leaf symptoms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118 (43), e2112825118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2112825118>.
- Bota J., Tomás M., Flexas J., Medrano H., Escalona J.M., 2016. Differences among grapevine cultivars in their stomatal behavior and water use efficiency under progressive water stress. *Agricultural Water Management*, 164 (1), 91-99, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.016>.
- Boyer J., 2016a. Rôle de la recherche et de l'innovation dans l'adaptation des vignobles français au changement climatique, thèse de doctorat, Économie, Montpellier SupAgro.
- Boyer J., 2016b. L'implication des acteurs de la recherche dans les processus d'adaptation au changement climatique : l'exemple des régions viticoles françaises. *Revue d'économie et de management de l'innovation*, 51, 147-172, <https://doi.org/10.3917/inno.051.0147>.
- Boyer J., Ozor J., Rondé P., 2021. Local innovation ecosystem: structure and impact on adaptive capacity of firms. *Industry and Innovation*, 28 (5), 620-650, <https://doi.org/10.1080/13662716.2021.1891407>.
- Boyer J., Touzard J.-M., 2016. Rôle de la recherche et de l'innovation dans la compétitivité des vignobles français : une analyse par les institutions. *Systèmes alimentaires/Food Systems*, 1, 69-96.
- Boyer J., Touzard J.-M., 2021. To what extent do an innovation system and cleaner technological regime affect the decision-making process of climate change adaptation? Evidence from wine producers in three wine clusters in France. *Journal of Cleaner Production*, 315, 1-13, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128218>.
- Brenot J., Quiquerez A., Petit C., Garcia J.-P., 2008. Erosion rates and sediment budgets in vineyards at 1-m resolution based on stock unearthing (Burgundy, France). *Geomorphology*, 100 (3-4), 345-355, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.005>.
- Brisson N., Beaudoin N., Mary B., Launay M., 2009. *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*, Quæ, Versailles, 298 p.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4), 309-332, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7).
- Brisson N., Levrault F., 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet Climator (2007-2010)*, éditions Ademe, Angers, 336 p.
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., de Deyn G., de Goede R., Flesskens L., Geissen V., Kuiper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., Van Groenigen J.W., Brussaard L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.
- Cáceres-Mella A., Talaverano M.I., Villalobos-González L., Ribalta-Pizarro C., Pastenes C., 2017. Controlled water deficit during ripening affects proanthocyanidin synthesis, concentration and composition in Cabernet Sauvignon grape skins. *Plant Physiology and Biochemistry*, 117, 34-41, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.015>.
- Caffarra A., Rinaldi M., Eccel E., Rossi V., Pertot I., 2012. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 89-101, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.017>.
- Cai A., Han T., Ren T., Sanderman J., Rui Y., Wang B., Smith P., Minggang X., Li Y., 2022. Declines in soil carbon storage under no tillage can be alleviated in the long run. *Geoderma*, 425, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116028>.
- Calleja-Cervantes M.E., Fernandez-Gonzalez A.J., Irigoyen I., Fernandez-Lopez M., Aparicio-Tejo P.M., Menendez S., 2015. Thirteen years of continued application of composted organic wastes in a vineyard modify soil quality characteristics. *Soil Biology and Biochemistry*, 90, 241-254, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.07.002>.

- Caquard S., Dimitrov S., 2017. Story Maps & Co. Un état de l'art de la cartographie des récits sur Internet. *Mappemonde*, 121, <https://doi.org/10.4000/mappemonde.3304>.
- Caquet T., 2017. Adaptation of viticulture and other agricultural activities to climate change: current challenges and perspectives for the Inra AAFCC metaprogramme. In : *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, Vigne & Vin Publications internationales.
- Carbonell-Bejerano P., Santa María E., Torres-Pérez R., Royo C., Lijavetzky D., Bravo G., Aguirreolea J., Sánchez-Díaz M., Antolín M.C., Martínez-Zapater J.M., 2013. Thermotolerance responses in ripening berries of *Vitis vinifera* L. cv Muscat Hamburg. *Plant and Cell Physiology*, 54 (7), 1200-1216, <https://doi.org/10.1093/pcp/pct071>.
- Carboneau A., 2001. Concepts « terroir ». In : *XI^e Journées Gesco*, 3-7 juillet, Montpellier, École nationale supérieure agronomique.
- Cardell M.F., Amengual A., Romero R., 2019. Future effects of climate change on the suitability of wine grape production across Europe. *Regional Environmental Change*, 19, 2299-2310, <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01502-x>.
- Carmona M.J., Chaïb J., Martínez-Zapater J.M., Thomas M.R., 2008. A molecular genetic perspective of reproductive development in grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 59 (10), 2579-2596, <https://doi.org/10.1093/jxb/ern160>.
- Carrier G., Huang Y.-F., Le Cunff L., Fournier-Level A., Vialet S., Souquet J.-M., Cheynier V., Terrier N., This P., 2013. Selection of candidate genes for grape proanthocyanidin pathway by an integrative approach. *Plant Physiology and Biochemistry*, 72, 87-95, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.04.014>.
- Casabianca F., Sylvander B., Noël Y., Béranger C., Coulon J.-B., Giraud G., Flutet G., Roncin F., Vincent E., 2006. Terroir et typicité : propositions de définitions pour deux notions essentielles à l'appréhension des indications géographiques et du développement durable. In : *Vle Congrès international sur les terroirs viticoles*, 2-7 juillet, Bordeaux-Montpellier.
- Casalí J., Giménez R., De Santisteban L., Álvarez-Mozos J., Mena J., Del Valle de Lersundi J., 2009. Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *Catena*, 78 (1), 12-19, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.02.015>.
- Casalta E., Mouret J.R., Sablayrolles J.M., 2021. Le contrôle de la fermentation alcoolique en conditions œnologiques : l'azote oui, mais... *Revue des œnologues*, 180, 38-41.
- Castellarin S.D., Matthews M.A., Di Gaspero G., Gambetta G.A., 2007. Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta*, 227 (1), 101-112, <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0598-8>.
- Castellarin S.D., Pfeiffer A., Sivilotti P., Degan M., Peterlunger E., Di Gaspero G., 2007. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruits of grapevine under seasonal water deficit. *Plant, Cell & Environment*, 30 (11), 1381-1399, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01716.x>.
- Cataldo E., Salvi L., Mattii G.B., 2021. Effects of irrigation on ecophysiology, sugar content and thiol precursors (3-S-cysteinylhexan-1-ol and 3-S-glutathionylhexan-1-ol) on *Vitis vinifera* cv. Sauvignon Blanc. *Plant Physiology and Biochemistry*, 164, 247-259, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.04.029>.
- Caubel J., García de Cortázar-Atauri I., Launay M., de Noblet-Ducoudré N., Huard F., Bertuzzi P., Graux A.I., 2015. Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical or quality criteria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 94-106, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.005>.
- Caubel J., Launay M., García de Cortázar-Atauri I., Ripoche D., Huard F., Buis S., Brisson N., 2014. A new integrated approach to assess the impacts of climate change on grapevine fungal diseases: the coupled MILA-STICS model. *Journal international des sciences de la vigne et du vin, spécial Laccave*, 45-54.
- Celette F., Gary C., 2013. Dynamics of water and nitrogen stress along the grapevine cycle as affected by cover cropping. *European Journal of Agronomy*, 45, 142-152, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.10.001>.
- Chacón-Vozmediano J.L., Martínez-Gascueña J., García-Navarro F.J., Jiménez-Ballesta R., 2020. Effects of water stress on vegetative growth and 'merlot' grapevine yield in a semi-arid mediterranean climate. *Horticulturae*, 6 (4), <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040095>.
- Chaloner T.M., Gurr S.J., Bebbler D.P., 2021. Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, 11, 710-715, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01104-8>.

- Chaminade C., Randelli F., 2020. The role of territorially embedded innovation ecosystems accelerating sustainability transformations: a case study of the transformation to organic wine production in Tuscany (Italy). *Sustainability*, 12 (11), <https://doi.org/10.3390/su12114621>.
- Champagnon F., 1984. *Éléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale*, Montpellier, Inra, 351 p.
- Champeaux J.L., Tamburini A., 1996. Zonage climatique de la France à partir des séries de précipitations (1971-1990) du réseau climatologique d'État. *La Météorologie*, 14, 44-54.
- Charrier G., Delzon S., Domec J.C., Zhang L., Delmas C.E.L., Merlin I., Corso D., King A., Ojeda H., Ollat N., Prieto J.A., Scholach T., Skinner P., Van Leeuwen C., Gambetta G.A., 2018. Drought will not leave your glass empty: low risk of hydraulic failure revealed by long-term drought observations in world's top wine regions. *Science in Advance*, 4 (1), <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao6969>.
- Charrier G., Torres-Ruiz J., Badel E., Burlett R., Choat B., Cochard H., Delmas C., Domec J.-C., Jansen S., King A., Lenoir N., Martin-StPaul N., Gambetta G.A., Delzon S., 2016. Evidence for hydraulic vulnerability segmentation and lack of refilling under tension in grapevine. *Plant Physiology*, 172, 1657-1668, <https://doi.org/10.1104/pp.16.01079>.
- Chaves M.M., Zarrouk O., Francisco R., Costa J. M., Santos T., Regalado A.P., Rodrigues M.L., Lopes C.M., 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*, 105 (5), 661-676, <https://doi.org/10.1093/aob/mcq030>.
- Cheylus E., 2021. La diversité variétale comme levier d'adaptation au changement climatique : aptitudes agronomiques et œnologiques de 14 cépages étrangers dans le Languedoc, mémoire de fin d'études, Institut Agro/AgroParisTech, 97 p., <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03719861>.
- Chiffolleau Y., 2005. Learning about innovation through networks: the development of environment-friendly viticulture. *Technovation*, 25 (10), 1193-1204, <https://dx.doi.org/10.1016/j.technovation.2004.04.003>.
- Chiffolleau Y., Touzard J.-M., 2014. Understanding local agri-food systems through advice network analysis. *Agriculture and Human Values*, 31 (1), 19-32, <https://dx.doi.org/10.1007/s10460-013-9446-6>.
- Chira K., Schmauch G., Saucier C., Fabre S., Teissedre P.L., 2009. Grape variety effect on proanthocyanidin composition and sensory perception of skin and seed tannin extracts from bordeaux wine grapes (Cabernet Sauvignon and Merlot) for two consecutive vintages (2006 and 2007). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57 (2), 545-553, <https://doi.org/10.1021/jf802301g>.
- Chopin P., Blazy J.-M., Guindé L., Wery J., Doré T., 2017. A framework for designing multi-functional agricultural landscapes: application to Guadeloupe island. *Agricultural Systems*, 157, 316-329, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.003>.
- Chuine I., Yiou P., Viovy N., Seguin B., Daux V., Ladurie E.L.R., 2004. Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432, 289-290, <https://doi.org/10.1038/432289a>.
- Čiderová T., Ščasný M., 2022. Estimation of alcohol demand elasticity: consumption of wine, beer, and spirits at home and away from home. *Journal of Wine Economics*, 17 (4), 329-337, <https://doi.org/10.1017/jwe.2022.42>.
- Cleland E.E., Chuine I., Menzel A., Mooney H.A., Schwartz M.D., 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 22 (7), 357-365, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>.
- CLER, 2021. Porter un projet de territoire en transition, articuler les démarches méthodologiques, Réseau pour la transition énergétique, Ademe, 97 p.
- Coll P., Arnal D., Blanchart E., Hingsinger P., Le Cadre E., Souche G., Villenave C., 2009. Viticultural soils quality: benefits of permanent grass cover on soil chemical characteristics and soil biological indicators. *Progress agricole et viticole*, 126 (22), 527-531.
- Collins C., Ritchie M., James A., O'Brien P., Ma S., De Bei R., Clarke A., 2022. Grapevine recovery after fire and a first look at rapid damage assessment with satellite imagery. *OENO One*, 56 (2), 265-278, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5444>.
- ComMod, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures sciences sociétés*, 13 (2), 165-168, <https://doi.org/10.1051/nss:2005023>.
- Compagnone C., 2014. Burgundy winemakers and respect for the environment. Occupational networks and the dynamics of change. *Revue française de sociologie*, 55 (2), 319-358, <https://doi.org/10.3917/rfs.552.0319>.
- Compagnucci L., Spigarelli F., Coelho J., Duarte C., 2021. Living labs and user engagement for innovation and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 289, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125721>.

- Constant N., Auvergne C., Fortin N., Colin E., Gaviglio C., 2019. *Viticulture biologique – L’entretien du sol : réduire les coûts de production et la consommation en énergies fossiles*, Sudvinbio, chambre d’Agriculture de l’Hérault, FR CUMA, IFV, 23 p.
- Cooke P., Uranga M.G., Etxebarria G., 1997. Regional innovation systems: institutional and organisational dimensions. *Research Policy*, 26 (4-5), 475-491, [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(97\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(97)00025-5).
- Coombe B.G., 1987. Distribution of solutes within the developing grape berry in relation to its morphology. *American Journal of Enology and Viticulture*, 38 (2), 120-127, <https://doi.org/10.5344/ajev.1987.38.2.120>.
- Costantini L., Battilana J., Lamaj F., Fanizza G., Grando M.S., 2008. Berry and phenology-related traits in grapevine (*Vitis vinifera* L.): from quantitative trait loci to underlying genes. *BMC Plant Biology*, 8, 38, <https://doi.org/10.1186/1471-2229-8-38>.
- Costello M.J., Steinmaus S.J., Boisseranc C.J., 2017. Environmental variables influencing the incidence of Pierce’s disease. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23 (2), 287-295, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12262>.
- Coulouma G., Boizard H., Trotoux G., Lagacherie P., Richard G., 2006. Effect of deep tillage for vineyard establishment on soil structure: a case study in Southern France. *Soil and Tillage Research*, 88 (1-2), 132-143, <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.05.002>.
- CoupeL-Ledru A., 2015. Déterminismes physiologique et génétique de l’utilisation de l’eau chez la vigne (*Physiological and genetic determinisms of water-use in grapevine*), thèse de doctorat, Montpellier SupAgro.
- CoupeL-Ledru A., Lebon E., Christophe A., Doligez A., Cabrera-Bosquet L., Pechier P., Hamard P., This P., Simonneau T., 2014. Genetic variation in a grapevine progeny (*Vitis vinifera* L. cvs Grenache × Syrah) reveals inconsistencies between maintenance of daytime leaf water potential and response of transpiration rate under drought. *Journal of Experimental Botany*, 65 (21), 6205-6218, <https://doi.org/10.1093/jxb/eru228>.
- CoupeL-Ledru A., Tyerman S.D., Masclef D., Lebon E., Christophe A., Edwards E.J., Simonneau T., 2017. Abscisic acid down-regulates hydraulic conductance of grapevine leaves in isohydric genotypes only. *Plant Physiology*, 175 (3), 1121-1134, <https://doi.org/10.1104/pp.17.00698>.
- Cramer G.R., Van Sluyter S.C., Hopper D.W., Pascovici D., Keighley T., Haynes P.A., 2013. Proteomic analysis indicates massive changes in metabolism prior to the inhibition of growth and photosynthesis of grapevine (*Vitis vinifera* L.) in response to water deficit. *BMC Plant Biology*, 13, 49, <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-49>.
- Dai Z.W., Vivin P., Robert T., Milin S., Li S.H., Génard M., 2009. Model-based analysis of sugar accumulation in response to source-sink ratio and water supply in grape (*Vitis vinifera*) berries. *Functional Plant Biology*, 36 (6), 527-540, <https://doi.org/10.1071/FP08284>.
- Darriet P., Pons A., Drappier J., Andrée M., Cholet C., Redon P., Wu J., Pieri P., Geny-Denis L., 2019. Climate change and varietal aromatic component: between expected impact and experimental observations. In : *8th Symposium of the OENOVI International Network*, 13 mai, Athènes.
- Darriet P., Tominaga T., Lavigne V., Boidron J.N., Dubourdieu D., 1995. Identification of a powerful aromatic component of *Vitis vinifera* L. var. Sauvignon wines: 4-mercapto-4-methylpentan-2-one. *Flavour and Fragrance Journal*, 10 (6), 385-392, <https://doi.org/10.1002/ffj.2730100610>.
- David L., de Rességuier L., Petitjean T., Tissot C., Quénel H., Leroux R., Van Leeuwen C., 2023. An innovative interactive mapping tool to present research results: example of a terroir study in the context of climate change. *IVES Technical Reviews Vine and Wine*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2023.7652>.
- Dayer S., Herrera J.C., Dai Z., Burtlett R., Lamarque L.J., Delzon S., Bortolami G., Cochard H., Gambetta G.A., 2020. The sequence and thresholds of leaf hydraulic traits underlying grapevine varietal differences in drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71 (14), 4333-4344, <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa186>.
- Dayer S., Lamarque L.J., Burtlett R., Bortolami G., Delzon S., Herrera J.C., Cochard H., Gambetta G.A., 2022. Model-assisted ideotyping reveals trait syndromes to adapt viticulture to a drier climate. *Plant Physiology*, 190 (3), 1673-1686, <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac361>.
- De Orduna R., 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43 (7), 1844-1855, <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.001>.
- De Rességuier L., Mary S., Le Roux R., Petitjean T., Quénel H., Van Leeuwen C., 2020. Temperature variability at local scale in the bordeaux area. Relations with environmental factors and impact on vine phenology. *Frontiers in Plant Science*, 11, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00515>.

- De Rességuier L., Pieri P., Mary S., Pons R., Petitjean T., Van Leeuwen C., 2023. Characterisation of the vertical temperature gradient in the canopy reveals increased trunk height to be a potential adaptation to climate change. *OENO One*, 57 (1), 41-53, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.1.5365>.
- De Royer Dupré N., Schneider R., Payan J.C., Salançon E., Razungles A., 2014. Effects of vine water status on dimethyl sulfur potential, ammonium, and amino acid contents in Grenache Noir grapes (*Vitis vinifera*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62 (13), 2760-2766, <https://doi.org/10.1021/jf404758g>.
- Debolt S., Ristic R., Iland P.G., Ford C.M., 2008. Altered light interception reduces grape berry weight and modulates organic acid biosynthesis during development. *HortScience*, 43 (3), 957-961, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.957>.
- Del Cid C., Krugner R., Zeilinger A.R., Daugherty M.P., Almeida R.P., 2018. Plant water stress and vector feeding preference mediate transmission efficiency of a plant pathogen. *Environmental Entomology*, 47 (6), 1471-1478, <https://doi.org/10.1093/ee/nvy136>.
- Delay E., 2015. Réflexions géographiques sur l'usage des systèmes multi-agents dans la compréhension des processus d'évolution des territoires viticoles de fortes pentes : le cas de la Côte Vermeille et du Val di Cembra, thèse de doctorat, université de Limoges, 420 p.
- Deloire A., Rogiers S., Šuklje K., Antalick G., Zeyu X., Pellegrino A., 2021. Grapevine berry shrivelling, water loss and cell death: an increasing challenge for growers in the context of climate change. *IVES Technical Reviews vine and wine*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2021.4615>.
- Deloire A., Rogiers S., Trujillo P.B., 2022. What could be the architectural forms of future vines adapted to climate change: a new challenge! Let's discuss the Gobelet (Bush Vine). *IVES Technical Reviews vine and wine*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2022.5384>.
- Delrot S., Grimplet J., Carbonell-Bejerano P., Schwandner A., Bert P.-F., Bavaresco L., Costa L.D., Di Gasparo G., Duchêne E., Hausmann L., Malnoy M., Morgante M., Ollat N., Pecile M., Vezzulli S., 2020. Genetic and genomic approaches for adaptation of grapevine to climate change. In: *Genomic Designing of Climate-Smart Fruit Crops* (C. Kole, ed.), Springer, Cham, Allemagne, 157-270.
- Dequin S., Escudier J.L., Bely M., Noble J., Albertin W., Masneuf-Pomarède I., Marullo P., Salmon J.-M., Sablayrolles J.M. 2017. How to adapt winemaking practices to modified grape composition under climate change conditions? In: *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, 219-228, Vigne & Vin Publications internationales, Bordeaux.
- Derreudre J., Audran J.C., Leddet C., Ait Barka E., Brun, 1993. Réponse de la vigne (*Vitis vinifera* L.) aux températures inférieures à 0°C. III. Effets d'un refroidissement contrôlé sur des bourgeons au cours du débourrement. *Agronomie*, 13, 509-514.
- Devine-Wright P., Quinn T., 2020. Dynamics of place attachment in a climate changed world. In: *Place Attachment* (L. Manzo, P. Devine-Wright, eds.), Routledge, Londres.
- Dion R., 1990. *Histoire de la vigne et du vin en France, des origines au XIX^e siècle*, Flammarion, Paris.
- Dobesch H., Dumolard P., Dyras I., 2007. *Spatial Interpolation for Climate Data: The use of GIS in climatology and meteorology*, Newport Beach, ISTE, Londres, 284 p., <https://doi.org/10.1002/9780470612262>.
- Dokuchaev V.V., 1899. *A Contribution of the Theory of Natural Zones: Horizontal and vertical soil zones (in Russia)*, Mayor's Office Press, Saint-Petersbourg.
- Doligez A., Bertrand Y., Dias S., Grolier M., Ballester J.-F., Bouquet A., This P., 2010. QTLs for fertility in table grape (*Vitis vinifera* L.). *Tree Genetics & Genomes*, 6 (3), 413-422, <https://doi.org/10.1007/s11295-009-0259-0>.
- Doligez A., Bertrand Y., Farnos M., Grolier M., Romieu C., Esnault F., Dias S., Berger G., Francois P., Pons T., Ortigosa P., Roux C., Houel C., Laucou V., Bacilieri R., Peros J.P., This P., 2013. New stable QTLs for berry weight do not colocalize with QTLs for seed traits in cultivated grapevine (*Vitis vinifera* L.). *BMC Plant Biology*, 13, 217, <https://doi.org/10.1186/1471-2229-13-217>.
- Doligez A., Bouquet A., Danglot Y., Lahogue F., Riaz S., Meredith P., Edwards J., This P., 2002. Genetic mapping of grapevine (*Vitis vinifera* L.) applied to the detection of QTLs for seedlessness and berry weight. *Theoretical and Applied Genetics*, 105 (5), 780-795, <https://doi.org/10.1007/s00122-002-0951-z>.
- Döring J., Wohlfahrt Y., Kauer R., 2020. Could organic viticulture mitigate effects of climate change? In: *Oenobio International Conference-Book of abstracts*, 9 novembre, 10, Geisenheim University, Geisenheim.
- Dos Santos T.P., Lopes C.M., Rodrigues M.L., de Souza C.R., Maroco J.P., Pereira J.S., Silva J.R., Chaves M.M., 2003. Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology*, 30 (6), 663-671, <https://doi.org/10.1071/fp02180>.

- Downey M.O., Dokoozlian N.K., Krstic M.P., 2006. Cultural practice and environmental impacts on the flavonoid composition of grapes and wine: a review of recent research. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57 (3), 257-268, <https://doi.org/10.5344/ajev.2006.57.3.257>.
- Downey M.O., Harvey J.S., Robinson S.P., 2003. Analysis of tannins in seeds and skins of Shiraz grapes throughout berry development. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 9 (1), 15-27, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2003.tb00228.x>.
- Drappier J., Thibon C., Rabot A., Geny-Denis L., 2019. Relationship between wine composition and temperature: impact on Bordeaux wine typicity in the context of global warming-Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59 (1), 14-30, <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1355776>.
- Duchêne E., 2015. Une exploration des possibilités génétiques pour l'adaptation de la vigne au changement climatique, thèse de doctorat, Sciences agronomiques, université de Strasbourg, 179 p.
- Duchêne E., Butterlin G., Claudel P., Dumas V., Jaegli N., Merdinoglu D., 2009. A grapevine (*Vitis vinifera* L.) deoxy-d-xylulose synthase gene colocalizes with a major quantitative trait loci for terpenol content. *Theoretical and Applied Genetics*, 118 (3), 541-552, <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0919-8>.
- Duchêne E., Butterlin G., Claudel P., Jaegli N., 2016. Consequences of elevated temperatures during ripening on the biosynthesis of monoterpenols in grape berries. In: *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, Vigne & Vin Publications Internationales, Bordeaux.
- Duchêne E., Butterlin G., Dumas V., Merdinoglu D., 2012. Towards the adaptation of grapevine varieties to climate change: QTLs and candidate genes for developmental stages. *Theoretical and Applied Genetics*, 124 (4), 623-635, <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1734-1>.
- Duchêne E., Dumas V., Butterlin G., Jaegli N., Rustenholz C., Chauveau A., Berard A., Le Paslier M.C., Gaillard I., Merdinoglu D., 2020. Genetic variations of acidity in grape berries are controlled by the interplay between organic acids and potassium. *Theoretical and Applied Genetics*, 133 (3), 993-1008, <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03524-9>.
- Duchêne E., Dumas V., Jaegli N., Merdinoglu D., 2012. Deciphering the ability of different grapevine genotypes to accumulate sugar in berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18 (3), 319-328, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2012.00194.x>.
- Duchêne E., Dumas V., Jaegli N., Merdinoglu D., 2014. Genetic variability of descriptors for grapevine berry acidity in Riesling, Gewürztraminer and their progeny. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20 (1), 91-99, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12051>.
- Duchêne E., Huard F., Dumas V., Schneider C., Merdinoglu D., 2010. The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*, 41 (3), 193-204, <https://doi.org/10.3354/CR00850>.
- Duchêne E., Schneider C., 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, 25 (1), 93-99, <https://doi.org/10.1051/agro:2004057>.
- Dupraz C., Liagre F., 2008. *Agroforesterie : Des arbres et des cultures*, France agricole, Paris, 432 p.
- Dupraz C., Marrou H., Talbot G., Dufour L., Nogier A., Ferard Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, 36 (10), 2725-2732, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.
- Ebadi A., Coombe B.G., May P., 1995. Fruit-set on small Chardonnay and Shiraz vines grown under varying temperature regimes between budburst and flowering. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1 (1), 3-10, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1995.tb00071.x>.
- Edouard S., Combes D., Van Iseghem M., Tin M.N.W., Escobar-Gutiérrez A.J., 2023. Increasing land productivity with agriphotovoltaics: application to an alfalfa field. *Applied Energy*, 329, 120207, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120207>.
- Edwards E.J., Smithson L., Graham D.C., Clingeffer P.R., 2011. Grapevine canopy response to a high-temperature event during deficit irrigation. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17 (2), 153-161, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00125.x>.
- Escalona J.M., Tomàs M., Martorell S., Medrano H., Ribas-Carbo M., Flexas J., 2012. Carbon balance in grapevines under different soil water supply: importance of whole plant respiration. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18 (3), 308-318, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2012.00193.x>.
- Escudier J.L., Bes M., Salmon J.M., Caillé S., Samson A., 2014. Stress hydrique prolongé des vignes : comment adapter les pratiques œnologiques en conséquence? *Innovations Agronomiques*, 38, 67-86, <https://hal.inrae.fr/hal-02638137/document>.

- Etzkowitz H., Leydesdorff L., 2000. The dynamics of innovation: from national systems and "Mode 2" to a triple helix of university-industry-government relations. *Research Policy*, 29 (2), 109-123, [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4).
- Fabre J.-C., Rabotin M., Crevoisier D., Libres A., Dagès C., Moussa R., Louchart X., Lagacherie P., Raclot D., Voltz M., 2013. OpenFLUID: an open-source software environment for modelling fluxes in landscapes. In : *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 7-12 avril, Vienne, EGU2013-8821-1, EGU, Vienne.
- Falcão L.D., De Revel G., Perello M.C., Moutsiou A., Zanus M.C., Bordignon-Luiz M.T., 2007. A survey of seasonal temperatures and vineyard altitude influences on 2-Methoxy-3-isobutylpyrazine, C13-Norisoprenoids, and the sensory profile of Brazilian Cabernet Sauvignon wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55 (9), 3605-3612, <https://doi.org/10.1021/jf070185u>.
- Fanet J., 2001. *Les Terroirs du vin*, Hachette, Paris, 240 p.
- Fanizza G., Lamaj F., Costantini L., Chaabane R., Grandò M.S., 2005. QTL analysis for fruit yield components in table grapes (*Vitis vinifera*). *Theoretical and Applied Genetics*, 111, 658-664, <https://doi.org/10.1007/s00122-005-2016-6>.
- FAO, 2015. Les fonctions du sol, document d'information pour l'Année internationale des sols (AIS 2015), Rome, FAO, <https://www.fao.org/3/ax374f/ax374f.pdf>.
- FAO, 2021. The State of the world's land and water resources for food and agriculture: systems at breaking point, Rome, FAO, <https://doi.org/10.4060/cb7654en>.
- FAO, ITPS, 2015. Status of the world's soil resources (SWSR): main report, Rome, FAO, <http://www.fao.org/publications/card/en/c/c6814873-efc3-41db-b7d3-2081a10ede50>.
- FAO, ITPS, 2021. Recarbonizing global soils: a technical manual of recommended management practices. Volume 3: Cropland, grassland, integrated systems and farming approaches, Rome, FAO, <https://doi.org/10.4060/cb6595en>.
- Faralli M., Bontempo L., Bianchedi P. L., Moser C., Bertamini M., Lawson T., Camin F., Stefanini M., Varotto C., 2022. Natural variation in stomatal dynamics drives divergence in heat stress tolerance and contributes to seasonal intrinsic water-use efficiency in *Vitis vinifera* (subsp. *sativa* and *sylvestris*). *Journal of Experimental Botany*, 73 (10), 3238-3250, <https://doi.org/10.1093/jxb/erab552>.
- Faure G., Chiffolleau Y., Goulet F., Temple L., Touzard J.-M., 2018. *Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires*, Quæ, Versailles, 259 p.
- Favor K., Udawatta R.P., 2021. Belowground services in vineyard agroforestry systems. In : *Agroforestry and Ecosystem Services* (R.P. Udawatta, S. Jose, eds.), Springer, Cham, Allemagne, 65-94, https://doi.org/10.1007/978-3-030-80060-4_4.
- Fayolle E., Follain S., Marchal P., Chéry P., Colin F., 2019. Identification of environmental factors controlling wine quality: a case study in Saint-Emilion Grand Cru appellation, France. *Science of the Total Environment*, 694, 133718, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133718>.
- Fedele G., Donatti C., Harvey C., Hannah L., Hole D., 2019. Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. *Environmental Science & Policy*, 101, 116-125, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.07.001>.
- Fernández-Mena H., Frey H., Celette F., Garcia L., Barkaoui K., Hossard L., Naulleau A., Métral R., Gary C., Metay A., 2021. Spatial and temporal diversity of service plant management strategies across vineyards in the south of France. *European Journal of Agronomy*, 123, 126191, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126191>.
- Fichtl L., Hofmann M., Kahlen K., Voss-Fels K.P., Cast C.S., Ollat N., Vivin P., Loose S., Nsib M., Schmid J., Strack T., Schultz H.R., Smith J., Friedel M., 2023. Towards grapevine root architectural models to adapt viticulture to drought. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1162506, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1162506>.
- Fila G., Gardiman M., Belvini P., Meggio F., Pitacco A., 2014. A comparison of different modelling solutions for studying grapevine phenology under present and future climate scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 192-205, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.011>.
- Flexas J., Barón M., Bota J., Ducruet J.-M., Gallé A., Galmés J., Jiménez M., Pou A., Ribas-Carbó M., Sajnani C., Tomàs M., Medrano H., 2009. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V. Berlandieri* × *V. Rupestris*). *Journal of Experimental Botany*, 60 (8), 2361-2377, <https://doi.org/10.1093/jxb/erp069>.
- Flexas J., Escalona J.M., Medrano H., 1998. Down-regulation of photosynthesis by drought under field conditions in grapevine leaves. *Functional Plant Biology*, 25 (8), 893-900, <https://doi.org/10.1071/pp98054>.

- Fluck E., Kunz M., Geissbuehler P., Ritz S.P., 2021. Radar-based assessment of hail frequency in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21 (2), 683-701, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-683-2021>.
- Folke C., Carpenter S., Walker B., Scheffer M., Chapin T., Rockström J., 2010. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15 (4), 20, <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>.
- Follain S., 2014. Cours de pédologie viticole. Module d'enseignement de l'option «Viticulture-œnologie», Montpellier SupAgro.
- Follain S., 2015. Géomorphologie des sols cultivés. Des modèles d'évolution à la conservation des sols, habilitation à diriger des recherches, université de Montpellier, 117 p.
- Follain S., Fayolle E., Noll D., Quiquerez A., 2018. Érosion des sols viticoles et adaptation aux changements : vulnérabilité, diagnostic et stratégie d'adaptation. *Revue des œnologues*, 166, 12-15.
- Fournier-Level A., Hugueney P., Verries C., This P., Ageorges A., 2011. Genetic mechanisms underlying the methylation level of anthocyanins in grape (*Vitis vinifera* L.). *BMC Plant Biology*, 11, <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-179>.
- Fraga H., García de Cortázar-Atauri I.G., Santos J.A., 2018. Viticultural irrigation demands under climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management*, 196, 66-74, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.023>.
- Fraga H., Malheiro A.C., Moutinho-Pereira J., Jones G.V., Alves F., Pinto J.G., Santos J.A., 2014. Very high resolution bioclimatic zoning of Portuguese wine regions: present and future scenarios. *Regional Environmental Change*, 14 (1), 295-306, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0490>.
- FranceAgriMer, 2016. Une prospective pour le secteur vignes et vins dans le contexte du changement climatique. Les synthèses de FranceAgriMer, 40, 21 p.
- FranceAgriMer, 2022. Ventes et achats de vins tranquilles, bilan 2021, 72 p., <https://www.franceagrimer.fr/content/download/69273/document/BIL-VIN-2022-Achats%20et%20ventes%20vins%20tranquilles%202021.pdf>.
- Friedel M., Frotscher J., Nitsch M., Hofmann M., Bogs J., Stoll M., Dietrich H., 2016. Light promotes expression of monoterpene and flavonol metabolic genes and enhances flavour of winegrape berries (*Vitis vinifera* L. cv. Riesling). *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22 (3), 409-421, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12229>.
- Fuentes Espinoza A., 2016. Vin, réchauffement climatique et stratégies des entreprises : comment anticiper la réaction des consommateurs? thèse de doctorat, université de Bordeaux.
- Fuentes González-Barreiro C., Rial-Otero R., Cancho-Grande B., Simal-Gandara J., 2015. Wine aroma compounds in grapes: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55 (2), 202-218, <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.650336>.
- Fuller M.P., Telli G., 1999. An investigation of the frost hardiness of grapevine (*Vitis vinifera*) during bud break. *Annals of Applied Biology*, 135 (3), 589-595, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1999.tb00891.x>.
- Galarneau E.R., Lawrence D.P., Travadon R., Baumgartner K., 2019. Drought exacerbates botryosphaeria dieback symptoms in grapevines and confounds host-based molecular markers of infection by *Neofusicoccum parvum*. *Plant disease*, 103 (7), 1738-1745, <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1549-RE>.
- Gambetta G.A., Herrera J.C., Dayer S., Feng Q., Hochberg U., Castellari S.D., 2020. The physiology of drought stress in grapevine: towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 71 (16), 4658-4676, <https://doi.org/10.1093/jxb/era245>.
- Gambetta J.M., Holzapfel B.P., Stoll M., Friedel M., 2021. Sunburn in grapes: a review. *Frontiers in Plant Science*, 11, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.604691>.
- García de Cortázar-Atauri I., Brisson N., Gaudillère J.-P., 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology*, 53 (4), 317-326, <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>.
- García de Cortázar-Atauri I., Duchêne E., Destrac-Irvine A., Barbeau G., de Rességuier L., Lacombe T., Parker A.K., Saurin N., Van Leeuwen C., 2017. Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change. *OENO One*, 51 (2), 115-126, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1622>.
- García de Cortázar-Atauri I., Maury O., 2019. GETARI: Generic Evaluation Tool of AgRoClimatic Indicators, Recherche Data Gouv, V1, <https://doi.org/10.15454/IZUFAP>.

- García de Cortázar-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, thèse de doctorat, École nationale supérieure agronomique de Montpellier, 305 p.
- Garcia J.-P., 2010. Données nouvelles pour l'histoire de la construction des terroirs viticoles de Bourgogne, cinquante ans après l'œuvre de Roger Dion. In : *Le Bon Vin entre terroir, savoir-faire et savoir-boire : actualité de la pensée de Roger Dion* (J. Pitte, ed.), CNRS Éditions, Paris, 287-303.
- Garcia L., Celette F., Gary C., Ripoche A., Metay A., Garcia L., Valdés-Gómez H., 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: a review. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 251, 158-170, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.030>.
- Garcia L., Damour G., Gary C., Follain S., Le Bissonnais Y., Metay A., 2019. Trait-based approach for agroecology: contribution of service crop root traits to explain soil aggregate stability in vineyards. *Plant and Soil*, 435, 1-14, <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3874-4>.
- Gaudillère J.-P., Van Leeuwen C., Ollat N., 2002. Carbon isotope composition of sugars in grapevine, an integrated indicator of vineyard water status. *Journal of Experimental Botany*, 53, 757-763, <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.369.757>.
- Gaudin T., 2005. *La Prospective*, Presses universitaires de France, Paris, 126 p.
- Gautronneau Y., 1987. *Guide méthodique du profil cultural*, GEARA, Paris, 71 p.
- Gavrilescu C., Richard Y., Joly D., Bois B., 2018. Climate zoning of the Burgundy winegrowing region. *E3S Web of Conferences*, 50, 01003, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001003>.
- Gavrilescu C., Zito S., Richard Y., Castel T., Morvan G., Bois B., 2022. Frost risk projections in a changing climate are highly sensitive in time and space to frost modelling approaches. In : *Proceedings of ClimWine symposium*, 3-8 juillet, Bordeaux, IVES.
- Geffroy O., Siebert T., Herderich M., Mille B., Serrano E., 2016. On-vine grape drying combined with irrigation allows to produce red wines with enhanced phenolic and rotundone concentrations. *Scientia Horticulturae*, 207, 208-217, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.05.031>.
- Genty L., Kazakou E., Bastianelli D., Bopp M.-C., Barkaoui K., 2023. Promising weeds forage potential in perennial mediterranean agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 347, 108388, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108388>.
- Ghiglieno I., Simonetto A., Facciano L., Tonni M., Donna P., Valenti L., Gilioli G., 2023. Comparing the carbon footprint of conventional and organic vineyards in northern Italy. *Sustainability*, 15 (6), 5252, <https://doi.org/10.3390/su15065252>.
- Giordano M., Zecca O., Belviso S., Reinotti M., Gerbi V., Rolle L., 2013. Volatile fingerprint and physico-mechanical properties of 'Muscat blanc' grapes grown in mountain area. *Italian Journal of Food Science*, 25 (3), 329-338.
- Gis Sol, 2011. *L'État des sols de France*, Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- Giuggiola A., Rigling A., Dobbertin M., 2012. Reduction of stand density as a management tool to mitigate the effect of drought. In : *EGU General Assembly Conference*, 22-27 avril, Vienne, 12847, EGU.
- Giuliani E., Bell M., 2005. The micro-determinants of meso-level learning and innovation: evidence from a Chilean wine cluster. *Research Policy*, 34 (1), 47-68, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.10.008>.
- Giuliani E., Morrison A., Pietrobelli C., Rabellotti R., 2010. Who are the researchers that are collaborating with industry? An analysis of the wine sectors in Chile, South Africa and Italy. *Research Policy*, 39 (6), 748-761, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.03.007>.
- Gladstones J., 1992. *Viticulture and Environment*, Winetitles, Adelaide, Australie, 310 p.
- Gomès É., Maillot P., Duchêne É., 2021. Molecular tools for adapting viticulture to climate change. *Frontiers in Plant Science*, 12, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.633846>.
- Gontier L., Gaviglio C., 2013. La fin des herbicides ? Plusieurs stratégies innovantes d'entretien du sol à l'épreuve dans le Sud-Ouest. In : *1^{res} Assises des vins du Sud-Ouest*, 10 décembre, Gaillac, IFV, 21-25.
- Gouot J.C., Smith J.P., Holzzapfel B.P., Barril C., 2019b. Single and cumulative effects of whole-vine heat events on Shiraz berry composition. *OENO One*, 53 (2), 171-187, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2392>.
- Gouot J.C., Smith J.P., Holzzapfel B.P., Walker A.R., Barril C., 2019a. Grape berry flavonoids: a review of their biochemical responses to high and extreme high temperatures. *Journal of Experimental Botany*, 70 (2), 397-423, <https://doi.org/10.1093/jxb/ery392>.

- Gourvenec E., 2021. Les projets d'action collective pour l'adaptation des vignobles français au changement climatique : proposition de typologie et analyse de facteurs de réussite, mémoire de fin d'étude Istom, INRAE, UMR Innovation, Montpellier.
- Gouty-Borgès C., Prévost L., Ollat N., 2022. Changement climatique : les ODG favorables à des accompagnements. *Union girondine*, septembre 2022, 50-53.
- Graveline N., Tintinger M., Roux V., Touzard J.-M., 2022. *Climathon de Cabrières, 15 et 16 octobre 2021*, INRAE, 30 p., <https://dx.doi.org/10.17180/knp9-2f06>.
- Graveline N., Touzard J.-M., 2021. La contribution des démarches participatives. In : *Cahier régional Occitanie sur le changement climatique*, RECO, 188-189, <https://hal.inrae.fr/hal-03404232/document>.
- Greer D.H., 2018. The short-term temperature-dependency of CO₂ photosynthetic responses of two *Vitis vinifera* cultivars grown in a hot climate. *Environmental and Experimental Botany*, 147, 125-137, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.11.012>.
- Greer D.H., Weedon M.M., 2012. Modelling photosynthetic responses to temperature of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Semillon) leaves on vines grown in a hot climate. *Plant, Cell & Environment*, 35 (6), 1050-1064, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02471.x>.
- Greer D.H., Weedon M.M., Weston C., 2011. Reductions in biomass accumulation, photosynthesis in situ and net carbon balance are the costs of protecting *Vitis vinifera* 'Semillon' grapevines from heat stress with shade covering. *AoB PLANTS*, 2011, <https://doi.org/10.1093/aobpla/plr023>.
- Greer D.H., 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 (3), 206-214, <https://doi.org/10.1071/FP09209>.
- Guerfel M., Ouni Y., Boujnah D., Zarrouk M., 2010. Effects of the planting density on water relations and production of 'Chemlali' olive trees (*Olea europaea* L.). *Trees*, 24, 1137-1142, <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0486-x>.
- Guilpart N., Metay A., Gary C., 2014. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. *European Journal of Agronomy*, 54, 9-20, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.002>.
- Guilpart N., Roux S., Gary C., Metay A., 2017. The trade-off between grape yield and grapevine susceptibility to powdery mildew and grey mould depends on inter-annual variations in water stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 234-235, 203-211, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.023>.
- Gyenge J., Fernández M.E., Sarasola M., Schlichter T., 2011. Stand density and drought interaction on water relations of *Nothofagus antarctica*: contribution of forest management to climate change adaptability. *Trees*, 25, 1111-1120, <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0586-2>.
- Hale C.S., Buttrose M.S., 1974. Effect of temperature on ontogeny of berries of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon. *Journal of American Society of Horticultural Sciences*, 99 (5), 390-394, <https://doi.org/10.21273/JASHS.99.5.390>.
- Hallegatte S., Lecocq F., de Perthuis C., 2011. Designing climate change adaptation policies – An economic framework. *World Bank Policy Research Working Paper*, 5568.
- 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. *PNAS*, 110 (7), 6907-6912, <https://doi.org/10.1073/pnas.1210127110>.
- Hannin H., Couderc J.P., D'Hauteville F., Montaigne E. (eds.), 2010. *La Vigne et le vin*, La documentation française, Paris, 233 p.
- Hannin H., Touzard J.-M., 2021. Une démarche de prospective pour construire des stratégies d'adaptation à l'échelle régionale et nationale. In : *Cahier régional Occitanie sur le changement climatique*, RECO, 190-191, <https://hal.inrae.fr/hal-03404263>.
- Hannin H., Touzard J.-M., Aigrain P., Bois B., Brugière F., 2021. Le vignoble français face au changement climatique : l'élaboration d'une stratégie d'adaptation à partir de scénarios de prospective. In : *Management et marketing du vin : opportunités pour les entreprises et enjeux pour la filière* (F. Cheriet, C. Maurel, P. Amadiou, H. Hannin, eds.), ISTE Éditions, Paris, 55-76.
- Haselgrove L., Botting D., Van Heeswijck R., Høj P.B., Dry P.R., Ford C., Land P.G.I., 2000. Canopy microclimate and berry composition: the effect of bunch exposure on the phenolic composition of *Vitis vinifera* L cv. Shiraz grape berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6 (2), 141-149, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00173.x>.

- Hassenforder E., Ferrand N., Girard S., 2021. L'ingénierie de la participation : préparer et penser une démarche participative. *Sciences Eaux & Territoires*, 35, 28-35, <https://doi.org/10.3917/set.035.0028>.
- Haygarth P.M., Ritz K., 2009. The future of soils and land use in the UK: soil systems for the provision of land-based ecosystem services. *Land Use Policy*, 26 (1), S187-S197, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.09.016>.
- Hengl T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32 (9), 1283-1298, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>.
- Hill S.B., MacRae R.J., 1996. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture*, 7 (1), 81-87, https://doi.org/10.1300/J064v07n01_07.
- Hochberg U., Windt C.W., Ponomarenko A., Zhang Y.J., Gersony J., Rockwell F.E., Holbrook N.M., 2017. Stomatal closure, basal leaf embolism, and shedding protect the hydraulic integrity of grape stems. *Plant Physiology*, 174 (2), 764-775, <https://doi.org/10.1104/pp.16.01816>.
- Hofmann M., Volosciuk C., Dubrovský M., Maraun D., Schultz H.R., 2022. Downscaling of climate change scenarios for a high-resolution, site-specific assessment of drought stress risk for two viticultural regions with heterogeneous landscapes. *Earth System Dynamics*, 13 (2), 911-934, <https://doi.org/10.5194/esd-13-911-2022>.
- Hölscher K., Frantzeskaki N., 2021. Perspectives on urban transformation research: transformations in, of, and by cities. *Urban Transform*, 3, 2, <https://doi.org/10.1186/s42854-021-00019-z>.
- Huang Y.F., Violet S., Guiraud J.L., Torregrosa L., Bertrand Y., Cheynier V., This P., Terrier N., 2014. A negative MYB regulator of proanthocyanidin accumulation, identified through expression quantitative locus mapping in the grape berry. *New Phytologist*, 201 (3), 795-809, <https://doi.org/10.1111/nph.12557>.
- Huard F., 2021. Potentiel climatique de l'AOC Ventoux, étude à haute résolution en contexte de changement climatique, INRAE Agroclim, Avignon, 97 p., <https://doi.org/10.15454/yb61-bt78>.
- Hughson A.L., Boakes R.A., 2009. Passive perceptual learning in relation to wine: short-term recognition and verbal description. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62 (1), 1-8, <https://doi.org/10.1080/17470210802214890>.
- Huglin M.P., 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64, 1117-1126.
- Hühn T., Sponholz W.R., Bernath K., Friedmann A., Hess G., Muno H., Fromm W., 1999. The influence of high-energy shortwave radiation and other environmental factors on the genesis of compounds affecting the wine quality in *Vitis vinifera* L., cv. Mueller-Thurgau. *Viticultural and Enological Sciences*, 54 (4), 101-104.
- IPCC, 2014. Climate change 2014: synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment, report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, New-York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2019. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, New-York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment, report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, New-York, Cambridge University Press.
- IPCC, 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment, report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, New-York, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IPCC, 2023. Summary for policymakers. In : Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III, report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Genève, Suisse, 36 p.
- Ivit N.N., Longo R., Kemp B., 2020. The effect of non-*Saccharomyces* and *Saccharomyces non-cerevisiae* yeasts on ethanol and glycerol levels in wine. *Fermentation*, 6 (3), 77, <https://doi.org/10.3390/fermentation6030077>.
- Jackson D.I., Lombard P.B., 1993. Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality-a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44 (4), 409-430, <https://doi.org/10.5344/ajev.1993.44.4.409>.
- Jiang W., Parker M., Hayasaka Y., Simos C., Herderich M., 2021. Compositional changes in grapes and leaves as a consequence of smoke exposure of vineyards from multiple bushfires across a ripening season. *Molecules*, 26 (11), 3187, <https://doi.org/10.3390/molecules26113187>.
- Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailles J., Hilal M., Wavresky P., 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo, cartographie, imagerie, SIG 501*, <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23155>.

- Jones G.V., 2006. Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. In : *Fine Wine and Terroir, the Geoscience Perspective* (R.W. Macqueen, L.D. Meinert, eds.), Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland.
- Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73 (3), 319-343, <https://doi.org/10.1007/s10584-005-4704-2>.
- Joshi N., Agrawal S., Lie S., 2022. What does neighbourhood climate action look like? A scoping literature review. *Climate Action*, 1 (1), 1-13, <https://doi.org/10.1007/S44168-022-00009-2>.
- Jouan J., 2014. Les AOC viticoles face au changement climatique : exploration des voies d'adaptation par la prospective et l'analyse économique, mémoire de fin d'études d'ingénieur, AgroCampus Ouest, Rennes, 85 p.
- Juillion P., Lopez G., Fumey D., Lesniak V., Génard M., Vercambre G., 2022. Shading apple trees with an agrivoltaic system: impact on water relations, leaf morphophysiological characteristics and yield determinants. *Scientia Horticulturae*, 306, 111434, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111434>.
- Keller M., Tarara J.M., 2010. Warm spring temperatures induce persistent season long changes in shoot development in grapevines. *Annals of Botany*, 106 (1), 131-141, <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcq091>.
- Keller M., Tarara J.M., Mills L.J., 2010. Spring temperatures alter reproductive development in grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16 (3), 445-454, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00105.x>.
- Klerkx L., Van Mierlo B., Leeuwis C., 2012. Evolution of systems approaches to agricultural innovation: concepts, analysis and interventions. In : *Farming Systems Research into the 21st century: the New Dynamic* (I. Darnhofer I., D. Gibbon, B. Dedieu, eds.), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, 457-483, https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_20.
- Kliwer W.M., 1977. Effect of high temperatures during the bloom-set period on fruit-set, ovule fertility, and berry growth of several grape cultivars. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28 (4), 215-222, <https://doi.org/10.5344/ajev.1977.28.4.215>.
- Kliwer W.M., Lider L.A., Ferrari N., 1972. Effects of controlled temperature and light intensity on growth and carbohydrate Levels of 'Thompson Seedless' grapevines. *Journal of American Society for Horticultural Sciences*, 97 (2), 185-188, <https://doi.org/10.21273/JASHS.97.2.185>.
- Kliwer W.M., Torres R.E., 1972. Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration. *American Journal of Enology and Viticulture*, 23 (2), 71-77, <https://doi.org/10.5344/ajev.1972.23.2.71>.
- Knowling M.J., Bennett B., Ostendorf B., Westra S., Walker R.R., Pellegrino A., Edwards E.J., Collins C., Pagay V., Grigg D., 2021. Bridging the gap between data and decisions: a review of process-based models for viticulture. *Agricultural Systems*, 193, 103209, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103209>.
- Kobayashi H., Takase H., Suzuki Y., Tanzawa F., Takata R., Fujita K., Kohno M., Mochizuki M., Suzuki S., Konno T., 2011. Environmental stress enhances biosynthesis of flavor precursors, S-3-(hexan-1-ol)-glutathione and S-3-(hexan-1-ol)-L-cysteine, in grapevine through glutathione S-transferase activation. *Journal of Experimental Botany*, 62 (3), 1325-1336, <https://doi.org/10.1093/jxb/erq376>.
- Koch A., Ebeler S.E., Williams L.E., Matthews M.A., 2012. Fruit ripening in *Vitis vinifera*: light intensity before and not during ripening determines the concentration of 2-methoxy-3-isobutylpyrazine in Cabernet-Sauvignon berries. *Physiologia Plantarum*, 145 (2), 275-285, <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01572.x>.
- La Jeunesse I., Quevauviller P., 2016. *Changement climatique et cycle de l'eau : impacts, adaptation, législation et avancées scientifiques*, Lavoisier Tec&Doc, Paris, 325 p.
- Labarthe P., Schnebelin E., 2023. Apports des méthodes mixtes à la théorie de la régulation. In : *Théorie de la régulation, un nouvel état des savoirs* (R. Boyer, J.P. Chanteau, A. Labrousse, T. Lamarche, eds.), Dunod, Malakoff, 195-202.
- Lal R., 2004. Soil carbon sequestration Impacts on global climate change and food security. *Science*, 304 (5677), 1623-1627, <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
- Lamarque L.J., Delmas C.E.L., Charrier G., Burrett R., Dell'Acqua N., Pouzoulet J., Gambetta G., Delzon S., 2023. Quantifying the grapevine xylem embolism resistance spectrum to identify varieties and regions at risk in a future dry climate. *Scientific Reports*, 13, 7724, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34224-6>.
- Lautridou J.P., 1985. Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie, thèse de doctorat, université de Caen, 908 p.
- Laville P., 1993. Unités de terroir naturel et terroir. Une distinction nécessaire pour redonner plus de cohérence au système d'appellation d'origine. *Bulletin de l'OIV*, 25, 745-746.

- Le Bissonais Y., Lecomte V., Cerdan O., 2004. Grass strip effects on runoff and soil loss. *Agronomie*, 24 (3), 129-36, <https://dx.doi.org/10.1051/agro:2004010>.
- Le Menn N., Van Leeuwen C., Picard M., Riquier L., de Revel G., Marchand S., 2019. Effect of vine water and nitrogen status, as well as temperature, on some aroma compounds of aged red Bordeaux wines. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67 (25), 7098-7109, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00591>.
- Le Roux R., 2017. Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique, thèse de doctorat, spécialité Sciences de l'environnement, Rennes 2, 195 p.
- Le Roux R., de Rességuier L., Corpetti T., Jégou N., Madelin M., Van Leeuwen C., Quénoil H., 2017. Comparison of two fine scale spatial models for mapping temperatures inside winegrowing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 159-169, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.020>.
- Lebon E., Dumas V., Pieri P., Schultz H.R., 2003. Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30 (6), 699-710, <https://doi.org/10.1071/FP02222>.
- Lebon E., García de Cortázar-Atauri I., 2014. Dans un contexte de changement climatique, quels sont les impacts de la sécheresse sur la vigne et sur le devenir des vignobles ? L'exemple du Languedoc. *Innovations agronomiques*, 38, 1-12.
- Lebon G., Wojnarowicz G., Holzapfel B., Fontaine F., Vaillant-Gaveau N., Clément C., 2008. Sugars and flowering in the grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Experimental Botany*, 59 (10), 2565-2578, <https://doi.org/10.1093/jxb/ern135>.
- Lecourieux F., Kappel C., Pieri P., Charon J., Pillet J., Hilbert G., Renaud C., Gomes E., Delrot S., Lecourieux D., 2017. Dissecting the biochemical and transcriptomic effects of a locally applied heat treatment on developing Cabernet Sauvignon grape berries. *Frontiers in Plant Science*, 8, 53, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00053>.
- Lemaître D., 2018. Formation et professionnalisation des ingénieurs en France : le modèle de l'école d'ingénieurs et ses recompositions. *Savoirs*, 47, 11-39, <https://doi.org/10.3917/savo.047.0011>.
- Leolini L., Moriondo M., Fila G., Costafreda-Aumedes S., Ferrise R., Bindi M., 2018. Late spring frost impacts on future grapevine distribution in Europe. *Field Crops Research*, 222, 197-208, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.018>.
- Lereboullet A.L., Beltrando G., Bardsley D.K., 2013. Socio-ecological adaptation to climate change: a comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 273-285, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.008>.
- Levy M., Lubell M., 2018. Innovation, cooperation, and the structure of three regional sustainable agriculture networks in California. *Regional Environmental Change*, 18, 1235-1246, <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1258-6>.
- Leydesdorff L., Strand Ø., 2012. Triple-helix relations and potential synergies among technologies, industries, and regions in Norway. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 52, 1-4, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.435>.
- Li J., Heap A.D., 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: a review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>.
- Lisanti M.T., Gambuti A., Piombino P., Pessina R., Moio, L., 2011. Sensory study on partial dealcoholization of wine by osmotic distillation process. *Bulletin de l'OIV*, 84 (959), 95-105.
- Louchart X., Voltz M., Andrieux P., Moussa R., 2001. Herbicide transport to surface waters at field and watershed scales in a mediterranean vineyard area. *Journal of Environmental Quality*, 30, 982-991, <https://doi.org/10.2134/jeq2001.303982x>.
- Lovisol C., Perrone I., Carra A., Ferrandino A., Flexas J., Medrano H., Schubert A., 2010. Drought-induced changes in development and function of grapevine (*Vitis* spp.) organs and in their hydraulic and non-hydraulic interactions at the whole-plant level. *Functional Plant Biology*, 37 (2), 98, <https://doi.org/10.1071/FP09191>.
- Lusk J.L., Shogren J.F., 2007. *Experimental Auctions: Methods and applications in economic and marketing research*, Cambridge University Press, Cambridge, New York, 304 p.
- Mairata A., Tortosa I., Douthe C., Escalona J. M., Pou A., Medrano H., 2022. Comparing selection criteria to select grapevine clones by water use efficiency. *Agronomy*, 12 (8), <https://doi.org/10.3390/agronomy12081963>.
- Malerba F., 2002. Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31 (2), 247-264, [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00139-1).
- Mamy L., Voltz M., Bedos C., Benoit P., Barriuso E., 2014. Des pratiques agricoles aux transferts de pesticides dans l'environnement : observations, modèles, utilisation dans l'évaluation des risques, séminaire. In : *Pesticides, écotoxicologie et exposition environnementale*, 11-12 décembre, Paris, Inra.

- Marguerit E., Brendel O., Lebon E., Van Leeuwen C., Ollat N., 2012. Rootstock control of scion transpiration and its acclimation to water deficit are controlled by different genes. *New Phytologist*, 194 (2), 416-429, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04059.x>.
- Marguerit E., Lagalle L., Lafargue M., Tandonnet J.-P., Goutouly J.-P., Beccavin I., Roques M., Audeguin L., Ollat N., 2019. GreffAdapt: a relevant experimental vineyard to speed up the selection of grapevine rootstocks. In : *Proceedings of the 21th International Giesco meeting*, 23-26 juin, Thessalonique, Giesco, 204-208, IVES, <https://ives-openscience.eu/4150>.
- Marjou M., García de Cortazar-Atauri I., 2019. Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux, rapport technique, INRAE, 94 p., <https://dx.doi.org/10.15454/1.5586048305359907E12>.
- Maroco J.P., Rodrigues M.L., Lopes C., Chaves M., 2002. Limitations to leaf photosynthesis in field-grown grapevine under drought-Metabolic and modelling approaches. *Functional Plant Biology*, 29 (4), 451-459, <https://doi.org/10.1071/pp01040>.
- Marques K., Lermen F., Gularte A., de Magalhães R., Danilevicz Â., Echeveste M., 2021. Inside of an innovation ecosystem: evidence from the Brazilian wine sector. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 27 (1), 66-80, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12461>.
- Marrou H., Guilioni L., Dufour L., Dupraz C., Wery J., 2013a. Microclimate under agrivoltaic systems: is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117-132, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>.
- Marrou H., Wéry J., Dufour L., Dupraz C., 2013b. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>.
- Martin G., Felten B., Magne M.-A., Piquet M., Sautier M., 2012. Le rami fourrager : un support pour la conception de scénarios de systèmes fourragers avec des éleveurs et des conseillers. *Fourrages*, 210, 119-128, <https://hal.inrae.fr/hal-02650488>.
- Martínez-Lüscher J., Sánchez-Díaz M., Delrot S., Aguirreolea J., Pascual I., Gomès E., 2016. Ultraviolet-B alleviates the uncoupling effect of elevated CO₂ and increased temperature on grape berry (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) anthocyanin and sugar accumulation. *Australian journal of Grape and Wine Research*, 22 (1), 87-95, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12213>.
- Matsui S., Ryugo K., Kliewer W.M., 1986. Growth inhibition of thompson seedless and napa gamay berries by heat stress and its partial reversibility by applications of growth regulators. *American Journal of Enology and Viticulture*, 37 (1), 67-71, <https://doi.org/10.5344/ajev.1986.37.1.67>.
- McDowell N., Pockman W.T., Allen C.D., Breshears D.D., Cobb N., Kolb T., Yepez E.A., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought?. *New phytologist*, 178 (4), 719-739, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>.
- McDowell N.G., 2011. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. *Plant Physiology*, 155 (3), 1051-1059, <https://doi.org/10.1104/pp.110.170704>.
- McNamara K.E., Buggy L., 2017. Community-based climate change adaptation: a review of academic literature. *Local Environment*, 22 (4), 443-460, <https://doi.org/10.1080/13549839.2016.1216954>.
- Mcrae J.M., Schulkin A., Kassara S., Holt H.E., Smith P.A., 2013. Sensory properties of wine tannin fractions: implications for in-mouth sensory properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61 (3), 719-727, <https://doi.org/10.1021/jf304239n>.
- Medrano H., Escalona J.M., Cifre J., Bota J., Flexas J., 2003. A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology*, 30 (6), 607-619, <https://doi.org/10.1071/FP02110>.
- Meersmans J., Martin M.P., Lacarce E., de Baets S., Jolivet C., 2012. A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 32 (4), 841-851, <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0086-9>.
- Mees H.L.P., 2022. Why do citizens engage in climate action? A comprehensive framework of individual conditions and a proposed research approach. *Environmental Policy and Governance*, 32 (3), 167-178, <https://doi.org/10.1002/eet.1981>.
- Meggio F., 2022. The interplay between grape ripening and weather anomalies in Northern Italy – A modelling exercise. *OENO One*, 56 (2), 353-373, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5438>.
- Merot A., Thiollot-Sholtus M., Martinez A., 2023. Towards stopping pesticides: survey identification of on farm solutions, 22nd Giesco International meeting, 17-21 juillet, Cornell, Ithaca NY, États-Unis.

- Merrill N.K., García de Cortázar-Atauri I., Parker A.K., Walker M.A., Wolkovich E.M., 2020. Exploring grapevine phenology and high temperatures response under controlled conditions. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 516527, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.516527>.
- Metay A., Garcia L., Kazakou E., Fried G., 2022. Effet des couverts sur la flore en viticulture. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 12, 1-19, <https://dx.doi.org/10.54800/prt789>.
- Mirás-Avalos J.M., Intrigliolo D.S., 2017. Grape composition under abiotic constraints: water stress and salinity. *Frontiers in Plant Science*, 8, 851, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00851>.
- Molénat J., Dagès C., Bouteffeha M., Mekki I., 2021. Can small reservoirs be used to gauge stream runoff? *Journal of Hydrology*, 603, 127087, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127087>.
- Molitor D., Junk J., 2019. Climate change is implicating a two-fold impact on air temperature increase in the ripening period under the conditions of the Luxembourgish grapegrowing region. *OENO One*, 53 (3), 409-422, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.3.2329>.
- Moloney S., Fünfgeld H., Granberg M., 2018. *Local Action on Climate Change: Opportunities and constraints*, Routledge, New-York, 174 p.
- Montanarella L., Pennock D.J., McKenzie N., Badraoui M., Chude V., Baptista I., Mamo T., Yemefack M., Singh Aulakh M., Yagi K., Young Hong S., Vijarnsorn P., Zhang G.-L., Arrouays D., Black H., Krasilnikov P., Sobocká J., Alegre J., Henriquez C.R., de Lourdes Mendonça-Santos M., Taboada M., Espinosa-Victoria D., AlShankiti A., AlaviPanah S.K., Elsheikh E.A.E.M., Hempel J., Camps Arbestain M., Nachtergaele F., Vargas R., 2016. World's soils are under threat. *SOIL*, 2 (1), 79-82, <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>.
- Montgomery D.R., 2007. *Dirt: The erosion of civilizations*, University of California Press, Berkeley, 285 p.
- Morales-Castilla I., García de Cortázar-Atauri I., Cook B.I., Lacombe T., Parker A., Van Leeuwen C., Nicholas K.A., Wolkovich E.M., 2020. Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *PNAS*, 117 (6), 2864-2869, <https://doi.org/10.1073/pnas.1906731117>.
- 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, <https://doi.org/10.1093/jxb/erm055>.
- Moriondo M., Bindi M., Fagarazzi C., Ferrise R., Trombi G., 2010. Framework for high-resolution climate change impact assessment on grapevines at a regional scale. *Regional Environmental Change*, 11 (3), 553-567, <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0171-z>.
- Moriondo M., Ferrise R., Trombi G., Brilli L., Dibari C., Bindi M., 2015. Modelling olive trees and grapevines in a changing climate. *Environmental Modelling & Software*, 72, 387-401, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.016>.
- Moriondo M., Jones G.V., Bois B., Dibari C., Ferrise R., Trombi G., Bindi M., 2013. Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change*, 119, 825-839, <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0739-y>.
- Morlat R., 1989. Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins – application aux vignobles rouges de moyenne vallée de la Loire, thèse de doctorat, université de Bordeaux 2, 289 p.
- Mosedale J.R., Abernethy K.E., Smart R.E., Wilson R.J., Maclean I.M.D., 2016. Climate change impacts and adaptive strategies: lessons from the grapevine. *Global Change Biology*, 22 (11), 3814-3828, <https://doi.org/10.1111/gcb.13406>.
- Mouret R., Athès V., Aguera E., Lutton E., Boukhelifa N., Bideaux C., Aceves Lara C.A., Trelea I.C., Sablayrolles J.M., 2019. Winemaking fermentation: from online monitoring to modeling and multicriteria optimization. In : *9th IWA Conference on Sustainable Viticulture, Winery Wastes & Agro-Industrial Wastewater Management*, 3-5 juillet, Mons, Belgique.
- Nagahatenna D.S.K., Furlan T.S., Edwards E.J., Ramesh S.A., Pagay V., 2022. Insights into long-term acclimation strategies of grapevines (*Vitis vinifera* L.) in response to multi-decadal cyclical drought. *Agronomy*, 12 (12), <https://doi.org/10.3390/agronomy12123221>.
- Naulleau A., 2021. Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen, thèse de doctorat, Institut Agro Montpellier.
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Berteloot V., Fabre J.-C., Crevoisier D., Gaudin R., Hossard L., 2022a. Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. *Environmental Modelling & Software*, 150, 105342, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105342>.
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Hossard L., 2021. Evaluating strategies for adaptation to climate change in grapevine production, a systematic review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1-20, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.607859>.

- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Vinatier F., Hossard L., 2022b. How can winegrowers adapt to climate change? A participatory modeling approach in southern France. *Agricultural Systems*, 203, 103514, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103514>.
- Nearing M.A., Xie Y., Liu B., Ye Y., 2017. Natural and anthropogenic rates of soil erosion. *International Soil and Water Conservation Research*, 5 (2), 77-84, <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.04.001>.
- Neethling E., 2016. Adaptation de la viticulture au changement climatique : vers des scénarii à haute résolution, thèse de doctorat, Université Rennes 2, 193 p.
- Neethling E., Barbeau G., Coulon-Leroy C., Quénel H., 2019. Spatial complexity and temporal dynamics in viticulture: a review of climate-driven scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276-277, 107618, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107618>.
- Neethling E., Barbeau G., Julien S., le Roux R., Quénel H., 2017. Local-based approach for assessing climate change adaptation in viticulture. In : *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, 219-228, Vigne & Vin Publications Internationales, Bordeaux.
- Neethling E., Petitjean T., Quénel H., Barbeau G., 2017. Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive processes in the context of climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22, 777-803, <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9698-0>.
- Nicholas K.A., Durham W.H., 2012. Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: insights from winegrowing in Northern California. *Global Environmental Change*, 22 (2), 483-494, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.001>.
- Niculcea M., López J., Sánchez-Díaz M., Carmen Antolín M., 2014. Involvement of berry hormonal content in the response to pre- and post-veraison water deficit in different grapevine (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20 (2), 281-291, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12064>.
- Nougier M., Graveline N., Touzard J.-M., 2020. Climathon® de Montpeyroux : comment pérenniser les vignobles et les vigneronnes de Montpeyroux face aux évolutions climatiques et sociétales, INRAE, 34 p.
- Nougier M., Touzard J.-M., 2018. Le Climathon® de Murviel-lès-Montpellier : collaborations entre scientifiques, professionnels et citoyens pour l'adaptation d'un vignoble local au changement climatique, INRAE, 30 p., <https://hal.inrae.fr/hal-02787087>.
- OCDE, 2005. *Manuel d'Oslo : Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation*, Éditions de l'OCDE, Paris, 184 p., <https://doi.org/10.1787/9789264013124-fr>.
- OIV, 2010. Resolution OIV/VITI 333/2010, <https://www.oiv.int/public/medias/379/viti-2010-1-en.pdf>.
- Ojeda H., 2007. Irrigation qualitative de précision au vignoble. *Le Progrès agricole et viticole*, 124 (7), 133-141.
- 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. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53 (4), 261, <https://www.ajevonline.org/content/53/4/261.1>.
- Ojeda H., Bigard A., Escudier J.L., Samson A., Caillé S., Romieu C., Torregrosa L., 2017. De la vigne au vin : des créations variétales adaptées au changement climatique et résistant aux maladies cryptogamiques. *Revue des œnologues*, 165, 22-27.
- Ojeda H., Deloire A., Carbonneau A., 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis*, 40 (3), 141-145, <https://doi.org/10.5073/vitis.2001.40.141-145>.
- Ojeda H., Saurin N., 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. *Innovations agronomiques*, 38, 97-108.
- Ojeda H., Saurin N., Alvarez Gei S., Symoneaux R., Coulon-Leroy C., 2017. Precision irrigation of grapevines: methods, tools and strategies to maximize the quality and yield of the harvest and ensure water conservation in a context of climate change. In : *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, 94-203, Vigne & Vin Publications Internationales, Bordeaux.
- Oliva J., Stenlid J., Martinez-Vilalta J., 2014. The effect of fungal pathogens on the water and carbon economy of trees: implications for drought-induced mortality. *New Phytologist*, 203 (4), 1028-1035, <https://doi.org/10.1111/nph.12857>.
- Oliva Oller P., Notaro M., Langer E., Gary C., 2022. Structure and management of traditional agroforestry vineyards in the high valleys of southern Bolivia. *Agroforestry Systems*, 96 (2), 375-386, <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00725-4>.

- Ollat N., 2014. Impact du matériel végétal : changement climatique : le matériel végétal peut-il permettre de répondre aux risques accrus de sécheresse ? In : *Comptes-rendus du Colloque EuroViti « Gestion du régime hydrique de la vigne »*, 15 janvier, Angers, IFV, 17-22.
- Ollat N., Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Giraud-Héraud E., Hammond R., Hannin H., Touzard J.-M., 2020. À quoi pourrait ressembler la filière vigne et vin française en 2050 ? Une mobilisation concertée pour répondre à cet enjeu. In : *Fluctuations climatiques et vignobles. Du Néolithique à l'actuel : impacts, résilience et perspectives* (J. Pérard, C. Wolikow, eds.), Chaire Unesco, LIR3S, Dijon, 215-225.
- Ollat N., Bordenave L., Tandonnet J.P., Boursiquot J.M., Marguerit E., 2016. Grapevine rootstocks: origins and perspectives. *Acta Horticulturae*, 1136, 11-22, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1136.2>.
- Ollat N., Carde J.-P., Gaudillère J.-P., Barrieu F., Diakou-Verdin P., Moing A., 2002. Grape berry development: a review. *OENO One*, 36 (3), 109-131, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2002.36.3.970>.
- Ollat N., Peccoux A., Papura D., Esmenjaud D., Marguerit E., Tandonnet J.P., Bordenave L., Cookson S.J., Barrieu F., Rossdeutsch L., Lecourt J., Lauvergeat V., Vivin P., Bert P.F., Delrot S., 2015. Rootstocks as a component of adaptation to environment. In : *Grapevine in a Changing Environment* (H.M. Gil, M.M. Chaves, S. Delrot, eds.), Wiley, Chichester, Angleterre, 68-108, <https://doi.org/10.1002/9781118735985.ch4>.
- Ollat N., Quénel H., Barbeau G., Van Leeuwen C., Darriet P., García de Cortázar-Atauri I., Bois B., Ojeda H., Duchêne E., Lebon E., Vivin P., Torregrosa L., Sablayrolles J.M., Teil G., Lagacherie P., Giraud-Héraud E., Aigrain P., Touzard J.-M., 2018. Adaptation to climate change of the French wine industry: a systemic approach. *E3S Web of Conferences*, 50, 01020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001020>.
- Ollat N., Touzard J.-M., 2014. Long-term adaptation to climate change in viticulture and enology: the LACCAVE project. *Journal international des sciences de la vigne et du vin, spécial Laccave*, 1-7.
- Ollat N., Touzard J.-M., 2018. *La Vigne, le vin et le changement climatique. Projet Laccave - Horizon 2050*, édition INRAE, <https://dx.doi.org/10.15454/jt3y-1a55>.
- Ollat N., Touzard J.-M., García de Cortázar-Atauri I., Quénel H., Van Leeuwen C., 2017. Sustainable grape and wine production in the context of climate change. In : *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, Vigne & Vin Publications Internationales, Bordeaux.
- Ollat N., Touzard J.-M., Van Leeuwen C., 2016. Climate change impacts and adaptations: new challenges for the wine industry. *Journal of Wine Economics*, 11 (1), 139-149, <https://dx.doi.org/10.1017/jwe.2016.3>.
- Ollat N., Van Leeuwen C., García de Cortázar-Atauri I., Touzard J.M., 2017. The challenging issue of climate change for sustainable grape and wine production. *OENO One*, 51 (2), 59-60, <http://dx.doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1872>.
- Ollat N., Vivin P., de Miguel-Vega M., Tandonnet J.P., Lauvergeat V., Marguerit E., 2022. Le porte-greffe : un allié pour l'agroécologie ? *L'Union girondine*, hors-série L'Agroécologie au vignoble, 24-29.
- Ollat N., Zito S., Richard Y., Aigrain P., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Giraud-Héraud E., Hannin H., Touzard J.-M., Bois B., 2021. La diversité des vignobles français face au changement climatique : simulations climatiques et prospective participative. *Climatologie*, 18 (3), <https://doi.org/10.1051/climat/202118003>.
- ONERC, 2022. *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, La documentation française, Paris, 385 p.
- Owen D.H., Machamer P.K., 1979. Bias-free improvement in wine discrimination. *Perception*, 8 (2), 199-209, <https://doi.org/10.1068/p080199>.
- Payag V., Collins C., 2017. Effects of timing and intensity of elevated temperatures on reproductive development of field-grown Shiraz grapevines. *OENO One*, 51 (4), <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.4.1066>.
- Payag V., Tarita S., Furlan T.S., Kidman C.M., Nagahatenna D.S.K., 2022. Long term drought adaptation of unirrigated grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 34, 215-225, <https://doi.org/10.1007/s40626-022-00243-3>.
- Pare N., Andrieux P., Louchart X., Biarnes A., Voltz M., 2011. Predicting the spatio-temporal dynamic of soil surface characteristics after tillage. *Soil and Tillage Research*, 114 (2), 135-145, <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.04.003>.
- Parent B., Tardieu F., 2012. Temperature responses of developmental processes have not been affected by breeding in different ecological areas for 17 crop species. *New Phytologist*, 194 (3), 760-774, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04086>.

- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Chuine I., Barbeau G., Bois B., Boursiquot J.-M., Cahurel J.-Y., Claverie M., Dufourcq T., Gény L., Guimberteau G., Hofmann R.W., Jacquet O., Lacombe T., Monamy C., Ojeda H., Panigai L., Payan J.-C., Lovelle B.R., Rouchaud E., Schneider C., Spring J.-L., Storchi P., Tomasi D., Trambouze W., Trought M., Van Leeuwen C., 2013. Classification of varieties for their timing of flowering and veraison using a modelling approach: a case study for the grapevine species *Vitis vinifera* L. *Agricultural and Forest Meteorology*, 180, 249-264, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.06.005>.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Gény L., Spring J.-L., Destrac A., Schultz H., Molitor D., Lacombe T., Graça A., Monamy C., Stoll M., Storchi P., Trought M.C. T., Hofmann R. W., Van Leeuwen C., 2020a. Temperature-based grapevine sugar ripeness modelling for a wide range of *Vitis vinifera* L. cultivars. *Agricultural and Forest Meteorology*, 285-286, 107902, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107902>.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Trought M.C., Destrac A., Agnew R., Sturman A., Van Leeuwen C., 2020b. Adaptation to climate change by determining grapevine cultivar differences using temperature-based phenology models. *OENO One*, 54, 954-977, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3861>.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I., Van Leeuwen C., Chuine I., 2011. General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of *Vitis vinifera*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17 (2), 206-216, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x>.
- Paroissien J.-P., Lagacherie P., Le Bissonnais Y., 2010. A regional-scale study of multi-decennial erosion of vineyard fields using vine-stock unearthing-burying measurements. *Catena*, 82 (3), 159-168, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.06.002>.
- Pastore C., Dal Santo S., Zenoni S., Movahed N., Allegro G., Valentini G., Filippetti I., Tornielli G.B., 2017. Whole plant temperature manipulation affects flavonoid metabolism and the transcriptome of grapevine berries. *Frontiers in Plant Science*, 8, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00929>.
- Pauthier B., Bois B., Castel T., Thevenin D., Chateau Smith C., Richard Y., 2016. Mesoscale and local scale evaluations of quantitative precipitation estimates by weather radar products during a heavy rainfall event. *Advances in Meteorology*, e6089319, <https://doi.org/10.1155/2016/6089319>.
- Peccoux A., Loveys B., Zhu J., Gambetta G., Delrot S., Vivin P., Schultz H.R., Ollat N., Dai Z., 2018. Dissecting the rootstock control of scion transpiration using model-assisted analyses in grapevine. *Tree Physiology*, 38 (7), 1026-1040, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx153>.
- Pecqueur B., Zimmerman J.-B., 2004. *Économie de proximités*, Lavoisier, Paris, 264 p.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (5), 1633-1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pellegrino A., Clingeleffer P., Cooley N., Walker R., 2014. Management practices impact vine carbohydrate status to a greater extent than vine productivity. *Frontiers in Plant Science*, 5, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2014.00283>.
- Pellegrino A., Gozè E., Lebon E., Wery J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy*, 25 (1), 49-59, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.03.003>.
- Pèrès S., Giraud-Héraud E., Masure A.S., Tempere S., 2020. Rose wine market: anything but colour? *Foods*, 9 (12), 1850, <https://doi.org/10.3390/foods9121850>.
- Perrin A., Czynnek-Delètre M., Ben Jaballah M., Rouault A., Van der Werf H., Ghali M., Sigwalt A., Renaud-Gentié C., 2022. A participatory ecodesign framework to address both environmental and economic dimensions in viticulture at farm scale. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 10, <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00730-y>.
- 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.
- Petitjean T., de Rességuier L., Van Leeuwen C., Quénot H., 2020. Le changement climatique à l'échelle des vignobles : résultats du site pilote de Bordeaux, projet européen Life-Adviclim, 4 p.
- Petrie P.R., Clingeleffer P.R., 2005. Effects of temperature and light (before and after budburst) on inflorescence morphology and flower number of Chardonnay grapevines (*Vitis vinifera* L.). *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11 (1), 59-65, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2005.tb00279.x>.
- Peyrot Des Gachons C., Tominaga T., Dubourdieu D., 2002. Sulfur aroma precursor present in S-glutathione conjugate form: identification of S-3-(hexan-1-ol)-glutathione in must from *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50 (14), 4076-4079, <https://doi.org/10.1021/jf020002y>.

- Peyrot Des Gachons C., Van Leeuwen C., Tominaga T., Soyer J.P., Gaudillère J.P., Dubourdieu D., 2005. Influence of water and nitrogen deficit on fruit ripening and aroma potential of *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc in field conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 73-85, <https://doi.org/10.1002/jsfa.1919>.
- Picard M., Van Leeuwen C., Guyon F., Gaillard L., de Revel G., Marchand S., 2017. Vine water deficit impacts aging bouquet in fine red Bordeaux wine. *Frontiers in Chemistry*, 5, 56, <https://doi.org/10.3389/fchem.2017.00056>.
- Piccardo D., Favre G., Pascual O., Canals J.M., Zamora F., González-Neves G., 2019. Influence of the use of unripe grapes to reduce ethanol content and pH on the color, polyphenol and polysaccharide composition of conventional and hot macerated Pinot noir and Tannat wines. *European Food Research and Technology*, 245 (6), 1321-1335, <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03258-4>.
- Pichon L., Brunel G., Payan J.C., Taylor J., Bellon-Maurel V., Tisseyre B., 2021. ApeX-Vigne: experiences in monitoring vine water status from within-field to regional scales using crowdsourcing data from a free mobile phone application. *Precision Agriculture*, 22 (2), 608-626, <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09797-9>.
- Pieri P., Lebon E., 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)* (N. Brisson, F. Levrault, eds.), Ademe, Angers, 213-223.
- Pieri P., Lebon E., Brisson N., 2012. Climate change impact on French vineyards as predicted by models. *Acta Horticulturae*, 931, 29-37, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.931.2>.
- Plantevin M., Gowdy M., Destrac-Irvine A., Marguerit E., Gambetta G. A., Van Leeuwen C., 2022. Using $\delta^{13}\text{C}$ and hydroscales for discriminating cultivar specific drought responses. *OENO One*, 56 (2), 239-250, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5434>.
- Plummer R. 2013. Can adaptive comanagement help to address the challenges of climate change adaptation? *Ecology and Society*, 18 (4), 2, <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05699-180402>.
- Po M., 2020. *Impact du changement climatique sur l'environnement biotique de la vigne*, mémoire de Master 2, Université Paris-Est-Créteil, 42 p.
- Poitou X., Thibon C., Darriet P., 2017. 1,8-Cineole in french red wines : evidence for a contribution related to its various origins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65 (2), 383-393, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b03042>.
- Polge de Combret-Champart L., Guilpart N., Mérot A., Capillon A., Gary C., 2013. Determinants of the degradation of soil structure in vineyards with a view to conversion to organic farming. *Soil Use and Management*, 29 (4), 557-566, <https://doi.org/10.1111/sum.12071>.
- Poni S., 2023. *Designing and managing a sustainable vineyard in a climate change scenario*, Ed. Stefano Poni, 144 p.
- Pons A., Allamy L., Schüttler A., Rauhut D., Thibon C., Darriet P., 2017. What is the expected impact of climate change on wine aroma compounds and their precursors in grape? *OENO One*, 51 (2), 141-146, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1868>.
- Pons A., Cruège V.L., Thibon C., Redon P., Loisel C., Chevalier V., Darriet P., Dubourdieu D., 2019. Incidence de la perméabilité à l'oxygène de l'obturateur sur l'évolution des vins sur une période de 10 ans. *Revue des œnologues*, 171, 50-53.
- Porter M.E., 1998. Clusters and the new economics of competition. *Harvard Business Review*, 76 (6), 77-90.
- Porter M.E., Bond G., 1999. *The California Wine Cluster*, Harvard Business School, Boston, États-Unis.
- Pouget R., 1981. Action de la température sur la différenciation des inflorescences et des fleurs durant les phases de pré-débourrement et de post-débourrement des bourgeons latents de la vigne. *Connaissance vigne et vin*, 15 (2), 65-79, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.1981.15.2.1791>.
- Prieto J.A., Lebon É., Ojeda H., 2010. Stomatal behavior of different grapevine cultivars in response to soil water status and air water vapor pressure deficit. *OENO One*, 44 (1), 9-20, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2010.44.1.1459>.
- Prieto J.A., Louarn G., Perez Peña J., Ojeda H., Simonneau T., Lebon E., 2020. A functional-structural plant model that simulates whole canopy gas exchange of grapevine plants (*Vitis vinifera* L.) under different training systems. *Annals of Botany*, 126 (4), 647-660, <https://doi.org/10.1093/aob/mcz203>.
- Priour C., Rigaud J., Cheyrier V., Moutounet M., 1994. Oligomeric and polymeric procyanidins from grape seeds. *Phytochemistry*, 36 (3), 781-784, [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)89817-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)89817-9).

- Prost L., Berthet E.T.A., Cerf M., Jeuffroy M.-H., Labatut J., Meynard J.-M., 2017. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in Engineering Design*, 28, 119-129, <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0233-4>.
- Protet N., Bérud F., Mabile L., Jacquet O., 2022. Plantation : quelle longueur pour les racines? Fiche technique n° 3 du projet Origine, PNDV, <https://www.plan-deperissement-vigne.fr/outils/fiches-techniques/plantation-quelle-longueur-pour-les-racines>.
- Puga G., Anderson K., Jones G., Tchatoka F. D., Umberger W., 2022. A climatic classification of the world's wine regions. *OENO One*, 56 (2), 165-177, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.4627>.
- Quénol H., 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*, Lavoisier Tech&Doc, Paris, 444 p.
- Quénol H., García de Cortázar-Atauri I., Bois B., Sturman A., Bonnardot V., Roux R.L., 2017. Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards? *OENO One*, 51 (2), 91-97, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.18609>.
- Quénol H., Le Roux R., 2021. The spatial impacts of climate change on viticulture around the world. In : *Spatial Impacts of Climate Change* (D. Mercier, ed.), ISTE, Wiley, Londres, 225-242, <https://doi.org/10.1002/9781119817925.ch11>.
- Raclot D., Le Y., Louchart X., Andrieux P., Moussa R., Voltz M., 2009. Agriculture, ecosystems and environment soil tillage and scale effects on erosion from fields to catchment in a mediterranean vineyard area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134 (3-4), 201-210, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.06.019>.
- Raineau Y., Lecoq S., Giraud-Héraud E., Pérès S., Pons A., Tempère S., 2023. When health-related claims impact environmental demand: results of experimental auctions with Bordeaux wine consumers. *Ecological Economics*, 204 (A), 107-163, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107663>.
- Rajasekaran K., Mullins M.G., 1985. Somatic embryo formation by cultured ovules of Cabernet Sauvignon grape: effects of fertilization and of the male gametocide toluidine blue. *Vitis*, 24, 151-157, <https://doi.org/10.5073/vitis.1985.24.151-157>.
- Ramos M.C., Pérez-Álvarez E.P., Peregrina F., de Toda F. M., 2020. Relationships between grape composition of Tempranillo variety and available soil water and water stress under different weather conditions. *Scientia Horticulturae*, 262, 109063, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109063>.
- Ratten V., 2018. Eco-innovation and competitiveness in the Barossa Valley wine region. *Competitiveness Review*, 28 (3), 318-331, <https://doi.org/10.1108/CR-01-2017-0002>.
- Reineke A., Denis T., 2016. Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. *Journal of Pest Science*, 89 (2), 313-328, <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0761-8>.
- Remenyi T.A., Rollins D.A., Love P.T., Earl N.O., Bindo N.L., Harris R.M.B., 2019. *Australia's Wine Future: A climate atlas*, University of Tasmania, Hobart, 8 p.
- Renaud-Gentié C., Giudicelli A., Julien S., Grémy-Gros C., Suire R., 2022. Participatory eco-design at production basin scale, case study in viticulture. In : *13th International Conference on Life Cycle Assessment of Food*, 12-14 octobre, Lima, Pérou.
- Reynolds A.G., Heuvel J.E., 2009. Influence of grapevine training systems on vine growth and fruit composition: a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60 (3), 251-268, <https://doi.org/10.5344/ajev.2009.60.3.251>.
- Ribéreau-Gayon P., Lonvaud A., Donèche B., Dubourdiou D., 2017. *Traité d'œnologie*, Dunod, Paris.
- Rienth M., Scholasch T., 2019. State-of-the-art of tools and methods to assess vine water status. *OENO One*, 53 (4), 619-637, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.4.2403>.
- Rienth M., Torregrosa L., Luchaire N., Chatbanyong R., Lecourieux D., Kelly M.T., Romieu C., 2014. Day and night heat stress trigger different transcriptomic responses in green and ripening grapevine (*Vitis vinifera*) fruit. *BMC Plant Biology*, 14 (1), 108, <https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-108>.
- Rienth M., Torregrosa L., Sarah G., Ardisson M., Brillouet J.M., Romieu C., 2016. Temperature desynchronizes sugar and organic acid metabolism in ripening grapevine fruits and remodels their transcriptome. *BMC Plant Biology*, 16 (1), 1-23, <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0850-0>.
- Riou C., 1994. *The Effect of Climate on Grape Ripening: Application to the zoning of sugar content in the European community*, CECA-CEE-CECA, Luxembourg, 321 p.
- Roby J.-P., Van Leeuwen C., Marguerit E., 2008. *Références technico-économiques de systèmes de conduite de la vigne*, Lavoisier, Paris, 269 p.

- Rodima-Taylor D., Olwig M.F., Chhetri N., 2012. Adaptation as innovation, innovation as adaptation: an institutional approach to climate change. *Applied Geography*, 33, 107-111, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.011>.
- Rodrigo-Comino J., 2018. Five decades of soil erosion research in "terroir". The state-of-the-art. *Earth-Science Reviews*, 179, 436-447, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.014>.
- Rodrigo-Comino J., López-Vicente M., Kumar V., 2020. Soil science challenges in a new era: a transdisciplinary overview of relevant topics. *Air, Soil and Water Research*, 2020, 13, <https://doi.org/10.1177/1178622120977491>.
- Rogiers S.Y., Smith J.P., Holzapfel B.P., Hardie, W.J., 2011. Soil temperature moderates grapevine carbohydrate reserves after bud break and conditions fruit set responses to photoassimilatory stress. *Functional Plant Biology*, 38 (11), 899-909, <http://dx.doi.org/10.1071/FP10240>.
- Roland A., Schneider R., Razungles A., Cavelier F., 2011. Varietal thiols in wine: discovery, analysis and applications. *Chemical Reviews*, 111 (11), 7355-7376, <https://doi.org/10.1021/cr100205b>.
- Romero P., Navarro J.M., Ordaz P.B., 2022. Towards a sustainable viticulture: the combination of deficit irrigation strategies and agroecological practices in Mediterranean vineyards. *Agricultural Water Management*, 259, 1-29, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107216>.
- Ross A., Van Alstine J., Cotton M., Middlemiss L., 2021. Deliberative democracy and environmental justice: evaluating the role of citizens' juries in urban climate governance. *Local Environment*, 26 (12), 1512-1531, <https://doi.org/10.1080/13549839.2021.1990235>
- Rosdeutsch L., 2015. Contribution du métabolisme de l'ABA et de la conductivité hydraulique à la réponse de la transpiration en situation de contrainte hydrique chez la vigne – Variabilité génétique et effets du greffage, thèse de doctorat, université de Bordeaux, 214 p.
- Rouault A., Perrin A., Renaud-Gentié C., 2020. Using LCA in a participatory eco-design approach in agriculture: the example of vineyard management. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25 (7), 1368-1383, <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01684-w>.
- Sadras V.O., Moran M., Petrie P., 2017. Resilience of grapevine yield in response to warming. *OENO One*, 51(4), 381-386, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.4.1913>.
- Sadras V.O., Soar C.J., 2009. Shiraz vines maintain yield in response to a 2-4 °C increase in maximum temperature using an open-top heating system at key phenostages. *European Journal of Agronomy*, 31 (4), 250-258, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.09.004>.
- Salembier C., Elverdin J.H., Meynard J.M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-10, <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>.
- Salomé C., Coll P., Lardo E., Metay A., Villenave C., Marsden C., Blanchart E., Hinsinger P., Le Cadre E., 2016. The soil quality concept as a framework to assess management practices in vulnerable agroecosystems: a case study in mediterranean vineyards. *Ecological Indicators*, 61 (2), 456-465, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.047>.
- Sanders R.D., Boss P.K., Capone D.L., Kidman C.M., Maffei S., Jeffery D.W., 2023. Methoxy-pyrazine concentrations in the grape bunch rachis of *Vitis vinifera* L. Cv Shiraz: influence of rootstock, region and light. *Food Chemistry*, 408, 135234, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135234>.
- Santesteban L.G., 2020. Strategies for adapting vineyards to a changing climate. (Re)-learning from Mediterranean viticulture. *IVES Technical Reviews*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2020.3788>.
- Santillán D., Iglesias A., La Jeunesse I., Garrote L., Sotes V., 2019. Vineyards in transition: a global assessment of the adaptation needs of grape producing regions under climate change. *Science of The Total Environment*, 657, 839-852, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.079>.
- Santos J.A., Malheiro A.C., Pinto J.G., Jones G.V., 2012. Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing. *Climate Research*, 51, 89-103, <https://doi.org/10.3354/cr01056>.
- Sasaki K., Takase H., Matsuyama S., Kobayashi H., Matsuo H., Ikoma G., Takata R., 2016. Effect of light exposure on linalool biosynthesis and accumulation in grape berries. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 80 (12), 2376-2382, <https://doi.org/10.1080/09168451.2016.1217148>.
- Sautier M., Piquet M., Duru M., Martin-Clouaire R., 2017. Exploring adaptations to climate change with stakeholders: a participatory method to design grassland-based farming systems. *Journal of Environmental Management*, 193, 541-550, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.050>.

- Savi T., García González A., Herrera J.C., Forneck A., 2019. Gas exchange, biomass and non-structural carbohydrates dynamics in vines under combined drought and biotic stress. *BMC Plant Biology*, 19 (1), 1-11, <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2017-2>.
- Schaap B.F., Reidsma P., Verhagen J., Wolf J., Van Ittersum M.K., 2013. Participatory design of farm level adaptation to climate risks in an arable region in The Netherlands. *European Journal of Agronomy*, 48, 30-42, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.004>.
- Schaetzl R.J., Thompson M.L., 2015. *Soils: Genesis and geomorphology*, Cambridge University Press, New York, 795 p.
- Schnebelin É., Touzard J.-M., Macaine I., Labarthe P., 2022. Quel rôle pour les coopératives dans l'écologisation et la numérisation de l'agriculture? L'exemple de la viticulture en Occitanie (France). *RECMA*, 366, 33-49, <https://doi.org/10.3917/recma.366.0045>.
- Schreck E., Geret F., Gontier L., Treilhou M., 2008. Development and validation of a rapid multi residue method for pesticide determination using gas chromatography – mass spectro-metry: a realistic case in vineyard soils. *Talanta*, 77 (1), 298-303, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.06.026>.
- Schultz H., 2000. Climate change and viticulture: an European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 6 (1), 2-12, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2000.tb00156>.
- Schultz H., 2022. Soil, vine, climate change; the challenge of predicting soil carbon changes and greenhouse gas emissions in vineyards and is the 4 per 1000 goal realistic? *OENO One*, 56 (2), 251-263, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5447>.
- Schultz H.R., 2017. Issues to be considered for strategic adaptation to climate evolution: is atmospheric evaporative demand changing? *OENO One*, 51 (2), 107-114, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1619>.
- Schultz H.R., Lebon E., 2005. Modelling the effect of climate change on grape wine water relations. *Acta Horticulturae*, 689, 71-78, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.4>.
- Schüttler A., Fritsch S., Hoppe J.E., Schussler C., Jung R., Thibon C., Bruber B.R., Lafontaine M., Stoll M., De Revel G., Schultz H.R., Rauhut D., Darriet P., 2013. Facteurs influençant la typicité aromatique des vins du cépage de *Vitis vinifera* cv. Riesling. *Revue des œnologues*, 149S, 36-41.
- Schüttler A., Guthier C., Stoll M., Darriet P., Rauhut D., 2015. Impact of grape cluster defoliation on TDN potential in cool climate Riesling wines. *BIO Web of Conferences*, 5, 01006, <https://doi.org/10.1051/bioconf/20150501006>.
- Sébillotte M., Aigrain P., Hannin H., Sébillotte C., 2003. *Prospective vignes et vins : scénarios et défis pour la recherche et les acteurs*, Inra, Paris, 122 p.
- Sébillotte M., Sébillotte C., 2002. Recherche finalisée, organisations et prospective : la méthode prospective SYSPAHMM. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 9 (5), 329-345, <https://doi.org/10.1051/ocl.2002.0329>.
- Seguin B., García de Cortázar-Atauri I., 2005. Climate warming: consequences for viticulture and the notion of "terroirs" in Europe. *Acta Horticulturae*, 689, 61-70, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.3>.
- Serra I., Strever A., Myburgh P.A., Deloire A., 2014. Review: the interaction between rootstocks and cultivars to enhance drought tolerance in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20 (1), 1-14, <https://doi.org/10.1111/ajgw.12054>.
- Serrano A., Martínez-Gascueña J., Alonso G.L., Cebrián-Tarancón C., Carmona M.D., Mena A., Chacón-Vozmediano J.L., 2022. Agronomic response of 13 spanish red grapevine cultivars under drought conditions in a semi-arid mediterranean climate. *Agronomy*, 12 (10), 2399, <https://doi.org/10.3390/agronomy12102399>.
- Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Pagé C., Van Leeuwen C., 2018. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 226-242, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>.
- Sgubin G., Swingedouw D., García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Van Leeuwen C., 2019. The impact of possible decadal-scale cold waves on viticulture over Europe in a context of global warming. *Agronomy*, 9 (7), 397, <https://doi.org/10.3390/agronomy9070397>.
- Sgubin G., Swingedouw D., Mignot J., Gambetta G.A., Bois B., Loukos H., 2022. Non-linear loss of suitable wine regions over Europe in response to increasing global warming. *Global Change Biology*, 29 (3), 808-826, <https://doi.org/10.1111/gcb.16493>.
- Sgubin G., Swingedouw D., Mignot J., Gambetta G.A., Bois B., Loukos H., Noël T., Pieri P., García de Cortázar-Atauri I., Ollat N., Van Leeuwen C., 2023. Non-linear loss of suitable wine regions over Europe in response to increasing global warming. *Global Change Biology*, 29 (3), 808-826, <https://doi.org/10.1111/gcb.16493>.

- Simmonds P., Maye D., Gardner A., Ingram J., Raseta S., 2022. *Rural Climathon Playbook*, Countryside and Community Research Institute Report, University of Gloucestershire, <https://eprints.glos.ac.uk/id/eprint/11445>.
- Simonet G., 2010. Le concept d'adaptation : polysémie interdisciplinaire et implication pour les changements climatiques. *Natures sciences sociétés*, 17 (4), 392-401, <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2009-4-page-392.htm>.
- Simonneau T., 2023. Réponses de la vigne à la contrainte hydrique : vers une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. In : *Actes des VII^e assises des vins du Sud-Ouest*, 13 janvier, Toulouse, IFV, 35-41.
- Smart R.E., 1973. Sunlight interception by vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, 24 (4), 141-147, <https://doi.org/10.5344/ajev.1973.24.4.141>.
- Smart R.E., 1985. Principles of grapevine canopy microclimate manipulation with implications for yield and quality. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36 (3), 230-239, <https://doi.org/10.5344/ajev.1985.36.3.230>.
- Smart R.E., Robinson M., 1991. *Sunlight into Wine: A handbook for winegrape canopy management*, Winetitles, Adelaïde, Australie, 88 p.
- Smith J.P., Holzapfel B.P., 2009. Cumulative responses of semillon grapevines to late season perturbation of carbohydrate reserve status. *American Journal of Enology and Viticulture*, 60, 461-470, <https://www.ajevonline.org/content/60/4/461>.
- Soubeyroux J.-M., Bernus S., Corre L., Drouin A., Dubuisson B., Etchevers P., Gouget V., Josse P., Kerdoncuff M., Samacoits R., Tocquer F., 2021. Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole. In : *EGU General Assembly 2021*, 19-30 avril, en ligne, EGU, 21-9527, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9527>.
- Soussana J.-F., 2013. *S'adapter au changement climatique : agriculture, écosystèmes et territoires*, Quæ, Versailles, 282 p.
- Spayd S.E., Tarara J.M., Mee D.L., Ferguson J.C., 2002. Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* Merlot Berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, 53 (3), 171-182, <https://www.ajevonline.org/content/53/3/171>.
- Stavrínides M.C., Mills N.J., 2011. Influence of temperature on the reproductive and demographic parameters of two spider mite pests of vineyards and their natural predator. *BioControl*, 56, 315-325, <https://doi.org/10.1007/s10526-010-9334-6>.
- Steg L., 2018. Limiting climate change requires research on climate action. *Nature Climate Change*, 8 (9), 759-761, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0269-8>.
- Strakhov N.M., 1967. *Principles of Lithogenesis*, Oliver and Boyd, Édimbourg, Écosse, 245 p.
- Sturman A., Zawar-Reza P., Soltanzadeh I., Katurji M., Bonnardot V., Parker A.K., Trought M., Quénel H., Roux R.L., Gendig E., Schulmann T., 2017. The application of high-resolution atmospheric modelling to weather and climate variability in vineyard regions. *OENO One*, 51 (2), 99-105, <https://doi.org/10.20870/oenone.2017.51.2.1538>.
- Sun Y., Geng Q., Du Y., Yang X., Zhai H., 2017. Induction of cyclic electron flow around photosystem I during heat stress in grape leaves. *Plant Science*, 256, 65-71, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.12.004>.
- Suominen A., Seppänen M., Dedehayir O., 2019. A bibliometric review on innovation systems and ecosystems: a research agenda. *European Journal of Innovation Management*, 22 (2), 335-360, <https://doi.org/10.1108/EJIM-12-2017-0188>.
- Suter B., Destrac Irvine A., Gowdy M., Dai Z., Van Leeuwen C., 2021. Adapting wine grape ripening to global change requires a multi-trait approach. *Frontiers in Plant Science*, 12, 624867, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.624867>.
- Tarara J.M., Lee J., Spayd S.E., Scagel C.F., 2008. Berry temperature and solar radiation alter acylation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59 (3), 235-247, <https://doi.org/10.5344/ajev.2008.59.3.235>.
- Tardieu F., 2003. Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit. *Trends in Plant Science*, 8 (1), 9-14, [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)00008-0).
- Tardieu F., Simonneau T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand. *Journal of Experimental Botany*, 49, 419-432, https://doi.org/10.1093/jxb/49.Special_Issue.419.
- Teil G., 2017. Climate change and adaptation: Alsace and Loire Valley vintners' challenging point of view. In : *Proceedings of ClimWine2016*, 10-13 avril, Bordeaux, 97-97, Vigne & Vin Publications Internationales.

- Teissedre P.-L., Jourdes M., 2013. Tannins and anthocyanins of wine: Phytochemistry and organoleptic properties. In : *Natural Products: Phytochemistry, Botany and Metabolism of Alkaloids, Phenolics and Terpenes* (K.G. Ramawat, J.-M. Mérillon, eds), Springer, Berlin, 2255-2274.
- Tempère S., Pérès S., Fuentes Espinoza A., Darriet Ph., Giraud-Héraud E., Pons A., 2019. Consumer preferences for different red wine styles and repeated exposure effects. *Food Quality and Preference*, 73, 110-116, <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.12.009>.
- Thach L., 2018. The amazing resilience of wine grape vineyards. *Wine Economics and Policy*, 7 (1), 1-2, <https://doi.org/10.1016/j.wep.2018.04.002>.
- Thermes C., Bertrand F., La Jeunesse I., 2020. Les différentes formes de déplacement du vignoble : des leviers pour adapter la viticulture au changement climatique. *Norois*, 254, 75-90, <https://doi.org/10.4000/norois.9658>.
- Thibon C., Böcker C., Shinkaruk S., Moine V., Darriet P., Dubourdieu D., 2016. Identification of S-3-(hexanal)-glutathione and its bisulfite adduct in grape juice from *Vitis vinifera* L. cv. Sauvignon blanc as new potential precursors of 3SH. *Food Chemistry*, 199, 711-719, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.069>.
- Thornton P., 2014. Is the IPCC's Fifth Assessment Report telling us anything new about climate change and food security? *International Livestock Research Institute Seminars*, 11 juin 2014, <http://www.slideshare.net/ILRI/ilri-ls-eseminarthornton2014> (consulté le 2 mai 2016).
- Tissot C., Le Roux R., Rouan M., David L., Adoir E., Penavayre S., Irimia L., Patriche C., Hoffmann M., Cortiula C., 2021. *Life-Adviclim project : Saint-Emilion/Pomerol pilot site*, rapport final, 65 p., <https://www.adviclim.eu/wp-content/uploads/2020/12/B3-Pomerol-SaintEmilion-Technical-report.pdf>.
- Tissot C., Quenol H., Rouan M., 2020. Adaptation de la viticulture argentine à la variabilité climatique : une approche par simulation dans la région de Mendoza. *Norois*, 254, 91-108, <https://doi.org/10.4000/norois.9668>.
- Toffolini Q., Capitaine M., Hannachi M., Cerf M., 2021. Implementing agricultural living labs that renew actors' roles within existing innovation systems: a case study in France. *Journal of Rural Studies*, 88, 157-168, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.10.015>.
- Tomás M., Medrano H., Escalona J.M., Martorell S., Pou A., Ribas-Carbó M., Flexas J., 2014. Variability of water use efficiency in grapevines. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 148-157, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.003>.
- Tombesi S., Nardini A., Frioni T., Soccolini M., Zadra C., Farinelli D., Poni S., Palliotti A., 2015. Stomatal closure is induced by hydraulic signals and maintained by ABA in drought-stressed grapevine. *Scientific Reports*, 5 (1), <https://doi.org/10.1038/srep12449>.
- Tonietto J., Carbonneau A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and forest meteorology*, 124 (1-2), 81-97, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>.
- Torre A., Zimmermann J., 2015. Des clusters aux écosystèmes industriels locaux. *Revue d'économie industrielle*, 152, 13-38, <https://doi.org/10.4000/rei.6204>.
- Tortosa I., Escalona J.M., Opazo I., Douthe C., Medrano H., 2022. Genotype variations in water use efficiency correspond with photosynthetic traits in Tempranillo grapevine clones. *Agronomy*, 12 (8), 1874, <https://doi.org/10.3390/agronomy12081874>.
- Tournebize J., 2001. Impacts de l'enherbement du vignoble alsacien sur le transfert des nitrates, thèse de doctorat, Université Louis-Pasteur Strasbourg I.
- Touzard J.-M., Hannin H., 2023. Recherche et formation, facteurs de compétitivité et d'adaptation : l'exemple du cluster vigne-vin de Montpellier. In : *Marketing and Management in the Wine Industry* (F. Cherriet, P. Amadiou, C. Maurel, H. Hannin, eds.), ISTE, Londres, 217-235.
- Touzard J.-M., Ollat N., Aigrain P., Bois B., Brugière F., Duchêne E., García de Cortázar-Atauri I., Gautier J., Hammond R., Hannin H., 2020. La filière vigne et vin face au changement climatique : enseignements d'un forum de prospective pour le Val de Loire. *Norois*, 255, 83-89, <https://doi.org/10.4000/norois.9897>.
- Touzard J.-M., Temple L., Faure G., Triomphe B., 2015. Innovation systems and knowledge communities in the agriculture and agrifood sector: a literature review. *Journal of Innovation Economics and Management*, 17, 117-142, <https://doi.org/10.3917/jie.017.0117>.
- Treeby M.T., Holzzapfel B.P., Walker R.R., Nicholas P.R., 1998. Profiles of free amino acids in grapes of grafted Chardonnay grapevines. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 4 (3), 121-126, <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1998.tb00140>.

- Triolo R., Roby J.P., Plaia A., Hilbert G., Buscemi S., Di Lorenzo R., Van Leeuwen C., 2018. Hierarchy of factors impacting grape berry mass: separation of direct and indirect effects on major berry metabolites. *American Journal of Enology and Viticulture*, 69 (2), 103-112, <https://www.ajevonline.org/content/69/2/103>.
- United Nations, 2015. *The Millennium Development Goals Report*, United Nations, New York, 72 p.
- Van Dijk M., Morley T., Rau M.L., Sagai Y., 2021. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. *Nature Food*, 2, 494-501, <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>.
- Van Leeuwen C., 1991. Le vignoble de Saint-Émilion : répartition des sols et fonctionnement hydrique : incidences sur le comportement de la vigne et la maturation du raisin, thèse de doctorat, spécialité Œnologie-ampélogie, Bordeaux II, 154 p.
- Van Leeuwen C., Barbe J.C., Darriet P., Destrac-Irvine A., Gowdy M., Lytra G., Marchal A., Marchand S., Plantevin M., Poitou X., Pons A., Thibon, C., 2022. Aromatic maturity is a cornerstone of terroir expression in red wine. *OENO One*, 56 (2), 335-351, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5441>.
- Van Leeuwen C., Barbe J.C., Darriet P., Geffroy O., Gomès E., Guillaumie S., Helwi P., Laboyrie J., Lytra G., Le Menn N., Marchand S., Picard M., Pons A., Schüttler A., Thibon C., 2020. Recent advancements in understanding the terroir effect on aromas in grapes and wines. *OENO One*, 54 (4), 985-1006, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3983>.
- Van Leeuwen C., Bois B., 2018. Update in unified terroir zoning methodologies. *E3S Web of Conferences*, 50, 01044, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185001044>.
- Van Leeuwen C., Darriet P., 2016. The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*, 11 (1), 150-167, <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>.
- Van Leeuwen C., Destrac-Irvine A., 2017. Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51 (2), 147-154, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1647>.
- Van Leeuwen C., Destrac-Irvine A., Dubernet M., Duchêne E., Gowdy M., Marguerit E., Pieri P., Parker A., de Rességuier L., Ollat N., 2019. An update on the impact of climate change in viticulture and potential adaptations. *Agronomy*, 9 (9), 514, <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>.
- Van Leeuwen C., Pieri P., Gambetta G.A., Destrac Irvine A., de Rességuier L., Marguerit E., Marchand S., Farris L., Geffroy O., Ollat N., 2022. L'effet de l'état hydrique de la vigne sur la maturation du raisin. *Revue des œnologues*, 182, 24-27.
- Van Leeuwen C., Pieri P., Gowdy M., Ollat N., Roby J.P., 2019. Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a contexte of climate change. *OENO One*, 53 (2), 129-146, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2420>.
- Van Leeuwen C., Pieri P., Vivin P., 2010. Comparison of three operational tools for the assessment of vine water status: stem water potential, carbon isotope discrimination measured on grape sugar and water balance. In : *Methodologies and Results in Grapevine Research* (S. Delrot, H. Medrano, E. Or, L. Bavaresco, S. Grando, eds.), Springer, Dordrecht, Pays-Bas, 87-106, https://doi.org/10.1007/978-90-481-9283-0_7.
- Van Leeuwen C., Schultz H.R., García de Cortázar-Atauri I., Duchêne E., Ollat N., Pieri P., Bois B., Goutouly J.P., Quénel H., Touzard J.M., Malheiro A.C., Bavarescok L., Delrot S., 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (33), E3051-E3052, <https://doi.org/10.1073/pnas.1307927110>.
- Van Leeuwen C., Seguin G., 1994. Incidence de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin. *OENO One*, 28 (2), 81-110, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.1994.28.2.1152>.
- Van Leeuwen C., Tregoat O., Choné X., Bois B., Pernet D., Gaudillère J.P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red bordeaux wine: How can it be assessed for vineyard management purposes? *OENO One*, 43 (3), 121-134, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.3.798>.
- Van Niekerk J.M., Strevler A.E., du Toit P.G., Halleen F., Fourie P.H., 2011. Influence of water stress on Botryosphaeriaceae disease expression in grapevines. *Phytopathologia Mediterranea*, 50, 151-165, https://doi.org/10.14601/PHYTOPATHOL_MEDITERR-8968.
- Van Zyl J.J., 2001. The shuttle radar topography mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. *Acta Astronautica*, 48 (5), 559-565, [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00020-0](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00020-0).
- Vaudour E., 2002. The quality of grapes and wine in relation to geography: notions of terroir at various scales. *Journal of Wine Research*, 13 (2), 117-141, <https://doi.org/10.1080/0957126022000017981>.

- Vautard R., Van Oldenborgh G.J., Bonnet R., Li S., Robin Y., Kew S., Philip S., Soubeyrou J.M., Dubuisson B., Viovy N., 2023. Human influence on growing-period frosts like in early April 2021 in central France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23 (3), 1045-1058, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1045-2023>.
- Vicente J., Baran Y., Navascues E., Santos A., Calderon F., Marquina D., Rauhut D., Benito S., 2022. Biological management of acidity in wine industry: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 375, 109726, <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109726>.
- Vidal J.C., Moutounet M., 2007. Apports d'oxygène au cours du conditionnement des vins tranquilles et impact sur le fruité. *Revue des œnologues*, 125, 24-26.
- Vidal J.P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyrou J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30 (11), 1627-1644, <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.
- Vigüé V., Lecocq F., Touzard J.M., 2014. Viticulture and adaptation to climate change. *Journal international des sciences de la vigne et du vin, spécial Laccave*, 55-60.
- Vincent E., Flutet G., Pérard J., Jacquet O., Bois B., 2014. Topographical analysis of the hierarchical system of Burgundy appellations of origin. In : *10th International Terroir Congress - Proceedings*, 7-10 juillet, Tokaj, vol.1, 204-209, Corvinus University, Budapest.
- Vion C., Muro M., Bernard M., Richard B., Fautre V., Teramian N., Masneuf-Pomarede I., Tempere S., Marullo P., 2023. New malic acid producer strains of *Saccharomyces cerevisiae* for preserving wine acidity during alcoholic fermentation. *Food Microbiology*, 112, 104209, <https://doi.org/10.1016/j.fm.2022.104209>.
- Wang X., Li H., García de Cortázar-Atauri I., 2020. Assessing grapevine phenological models under chinese climatic conditions. *OENO One*, 54 (3), 637-656, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.3.3195>.
- Webb L.B., 2007. The impact of projected greenhouse gas-induced climate change on the Australian wine industry, PhD, University of Melbourne.
- Webb L.B., Whetton P.H., Barlow E.W., 2008. Climate change and winegrape quality in Australia. *Climate Research*, 36 (2), 99-111, <http://dx.doi.org/10.3354/cr00740>.
- Wenter A., Zanotelli D., Montagnani L., Tagliavini M., Andreotti C., 2018. Effect of different timings and intensities of water stress on yield and berry composition of grapevine (cv. Sauvignon blanc) in a mountain environment. *Scientia Horticulturae*, 236, 137-145, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.037>.
- White M.A., Diffenbaugh N.S., Jones G.V., Pal J.S., Giorgi F., 2006. Extreme heat reduces and shifts United States premium wine production in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (30), 11217-11222, <https://doi.org/10.1073/pnas.0603230103>.
- Wilhelm De Almeida L., Torregrosa L., Dournes G., Pellegrino A., Ojeda H., Roland A., 2023. New fungus-resistant grapevine *Vitis* and *V. vinifera* L. × *M. rotundifolia* derivative hybrids display a drought-independent response in thiol precursor levels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, online first, <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c08595>.
- Windholtz S., Vinsonneau E., Farris L., Thibon C., Masneuf-Pomarede I., 2021. Yeast and filamentous fungi microbial communities in organic red grape juice: effect of vintage, maturity stage, SO₂, and bioprotection. *Frontiers in Microbiology*, 12, 748416, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.748416>.
- Winkler A.J., Cook J.A., Kliewer W.M., Lider L.A., 1962. *General Viticulture*, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, 692 p.
- Wise R.R., Olson A.J., Schrader S.M., Sharkey T.D., 2004. Electron transport is the functional limitation of photosynthesis in field-grown Pima cotton plants at high temperature. *Plant, Cell & Environment*, 27 (6), 717-724, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01171.x>.
- Wohlfahrt Y., Patz C.D., Schmidt D., Rauhut D., Honermeier B., Stoll M., 2021. Responses on must and wine composition of *Vitis vinifera* L. cvs. Riesling and Cabernet Sauvignon under a free air CO₂ enrichment (FACE). *Foods*, 10 (1), 145, <https://doi.org/10.3390/foods10010145>.
- Wood C., Siebert T.E., Parker M., Capone D.L., Elsey G.M., Pollnitz A.P., Eggers M., Meier M., Vössing T., Widder S., Krammer G., Sefton M.A., Herderich M.J., 2008. From wine to pepper: rotundone, an obscure sesquiterpene, is a potent spicy aroma compound. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56 (10), 3738-3744, <https://doi.org/10.1021/jf800183k>.
- Wu J., Drappier V., Hilbert G., Guillaumie S., Dai Z., Geny L., Delrot S., Darriet P., Thibon C., Pieri P., 2019. The effects of a moderate grape temperature increase on berry secondary metabolites. *OENO One*, 53 (2), 321-333, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.2.2434>.

- Xu Y., Castel T., Richard Y., Cuccia C., Bois B., 2012. Burgundy regional climate change and its potential impact on grapevines. *Climate Dynamics*, 39 (7), 1613-1626, <https://doi.org/10.1029/2008GL037119>.
- Xyrafis E.G., Deloire A., Petoumenou D., Paraskevopoulos I., Biniari K., 2021. The unique and extreme vineyards of Santorini Island (Cyclades). *IVES Technical Reviews*, <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2021.4848>.
- Yang C., Menz C., Fraga H., Costafreda-Aumedes S., Leolini L., Ramos M.C., Molitor D., Van Leeuwen C., Santos J.A., 2022. Assessing the grapevine crop water stress indicator over the flowering-veraison phase and the potential yield lose rate in important European wine regions. *Agricultural Water Management*, 261, 107349, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107349>.
- Zarrouk O., Costa J.M., Francisco R., Lopes C., Chaves M.M., 2015. Drought and water management in Mediterranean vineyards. In: *Grapevine in a Changing Environment* (H. Gerós, M.M. Chaves, H.M. Gil, S. Delrot, eds.), Wiley, Chichester, Angleterre, 38-67, <http://dx.doi.org/10.1002/9781118735985.ch3>.
- Zavlyanova M., 2020. Faisabilité climatique de la viticulture en Bretagne dans le contexte du changement climatique : spatialisation d'indices bioclimatiques et identification des régions viticoles potentielles, mémoire de fin d'études, Bordeaux Sciences Agro, 50 p.
- Zavlyanova M., Bonnardot V., Van Leeuwen C., Quénel H., Ollat N., 2023. The use of GFV and GSR temperature-based models in emerging wine regions to help decision-making regarding choices in grape varieties and wine styles. Application to Brittany (France). *Vitis*, 62 (1), 10-26, <https://doi.org/10.5073/vitis.2023.62.10-26>.
- Zheng W., García J., Balda P., de Toda F. M., 2017. Effects of late winter pruning at different phenological stages on vine yield components and berry composition in La Rioja, North-central Spain. *OENO One*, 51 (4), 363-363, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.4.1863>.
- Zinelabidine L.H., Torres-Pérez R., Grimplet J., Baroja E., Ibáñez S., Carbonell-Bejerano P., Martínez-Zapater J.M., Ibáñez J., Tello J., 2021. Genetic variation and association analyses identify genes linked to fruit set-related traits in grapevine. *Plant Science*, 306, 110875, <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.110875>.
- Zito S., 2021. Évolution du risque phytosanitaire au vignoble dans le nord-est de la France en lien avec le changement climatique : observations et modélisation : cas de l'oïdium de la vigne, thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté, 224 p.
- Zito S., Pergaud J., Richard Y., Castel T., Le Roux R., García de Cortázar-Atauri I., Quenol H., Bois B., 2023. Projected impacts of climate change on viticulture over French wine regions using downscaled CMIP6 multi-model data. *OENO One*, 57 (2), 431-446, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2023.57.2.7441>.
- Zufferey V., Spring J.L., Verdenal T., Dienes A., Belcher S., Lorenzini F., Koestel C., Rösti J., Gindro K., Spangenberg J., Viret O., 2017. The influence of water stress on plant hydraulics, gas exchange, berry composition and quality of Pinot Noir wines in Switzerland. *OENO One*, 51 (1), <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.1.1314>.
- Zufferey V., Verdenal T., Dienes A., Belcher S., Lorenzini F., Koestel C., Blackford M., Bourdin G., Gindro K., Spangenberg J.E., Rösti J., Viret O., Carlen C., Spring J.L., 2020. The influence of vine water regime on the leaf gas exchange, berry composition and wine quality of Arvine grapes in Switzerland. *OENO One*, 54 (3),

Liste des auteurs

AIGRAIN PATRICK, FranceAgriMer, 12 allée Rol-Tanguy, 93100 Montreuil
// patrick.agrain@franceagrimer.fr

BADIER MICHEL, Chambre d'Agriculture de Loir-et-Cher, Antenne viticole et œnologique,
41140 Noyers-sur-Cher // badier.michel@orange.fr

BOIS BENJAMIN, (1) UMR Biogéosciences, CNRS/uB, Université de Bourgogne,
6 bd Gabriel, 21000 Dijon; (2) Inao, 12 allée Rol-Tanguy, 93100 Montreuil
// benjamin.bois@u-bourgogne.fr

BONNARDOT VALÉRIE, UMR LETG, CNRS, université Rennes 2, place Le Moal, 35043 Rennes
// valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr

BOYER JAMES, LEM, UMR CNRS 9221, HÉMiSF4iRE Design School, Université catholique de Lille,
60 bd Vauban, 59016 Lille // james.boyer@univ-catholille.fr

BRAULT OLIVIER, 49320 Vauchrétien // brault.o@wanadoo.fr

BRUGIÈRE FRANÇOISE, FranceAgriMer, 12 allée Rol-Tanguy, 93100 Montreuil
// francoise.brugiere@franceagrimer.fr

CHARLEROY ARNAUD, UMR Mistea, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// arnaud.charleroy@inrae.fr

COULOUMA GUILLAUME, UMR Lisah, INRAE, Institut Agro, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// guillaume.coulouma@inrae.fr

COUPEL-LEDRU AUDE, LEPSE, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// aude.coupeledru@inrae.fr

DARRIET PHILIPPE, UMR 1366 Œnologie, Univ. Bordeaux, INRAE, Bordeaux Sciences Agro, ISV,
33140 Villenave-d'Ornon // philippe.darriet@u-bordeaux.fr

DAVID LAURENCE, Institut Universitaire Européen de la Mer, rue Dumont-d'Urville,
29282 Plouzané // laurence.david@univ-brest.fr

DE RESSÉGUIER LAURE, UMR EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux, Sciences Agro, INRAE,
ISV, 210 ch. de Leysotte, 33140 Villenave-d'Ornon // laure.deresseguier@agro-bordeaux.fr

DELMAS CHLOÉ, SAVE, INRAE, Bordeaux Sciences Agro, ISV, 33140 Villenave-d'Ornon
// chloe.delmas@inrae.fr

DESTRAC-IRVINE AGNÈS, EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISV,
33140 Villenave-d'Ornon // agnes.destrac-irvine@inrae.fr

DUCHÈNE ÉRIC, UMR SVQV, INRAE Grand Est, 28 rue de Herrlisheim, 68000 Colmar
// eric.duchene@inrae.fr

FAYOLLE ÉTIENNE, 25 rue Tanesse, 33000 Bordeaux // etienne.fayolle@horizons-viticoles.fr

FOLLAIN STÉPHANE, UMR Agroécologie, Agrosup Dijon, 26 bd Petitjean, 21079 Dijon
// stephane.follain@agrosupdijon.fr

FUENTES ESPINOZA ALEJANDRO, OIV, 12 parvis de l'Unesco, 21000 Dijon // ecdroit@oiv.int

GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI IÑAKI, US AgroClim, INRAE, 228 route de l'Aérodrome, 84914 Avignon Cedex 9 // inaki.garciadecortazar@inrae.fr

GARY CHRISTIAN, UMR Absys, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier // christian.gary@inrae.fr

GASNIER MARIE, InterLoire, 62 rue Blaise-Pascal, 37019 Tours Cedex // m.gasnier@vinsvaldeloire.fr

GAUTIER JACQUES, Inao, 12 allée Rol-Tanguy, 93100 Montreuil // j.gautier@inao.fr

GAVIGLIO CHRISTOPHE, IFV Sud-Ouest, 81310 Lisle-sur-Tarn // christophe.gaviglio@vignevin.com

GIRAUD-HÉRAUD ÉRIC, université de Bordeaux, INRAE, CNRS, ISW, UMR BSE 6060, 33608 Pessac // eric.giraud-heraud@u-bordeaux.fr

GOULET ÉTIENNE, InterLoire, 62 rue Blaise-Pascal, 37019 Tours Cedex // e.goulet@vinsvaldeloire.fr

GOURVENNEC ÉLOI, UMR Innovation, 2 place Viala, 34060 Montpellier // eloi.gourvennec@gmail.com

GOUTOULY JEAN-PASCAL, (1) UMR EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISW, 210 ch. de Leysotte, 33140 Villenave-d'Ornon;
(2) UEVB, INRAE, 71 av. Édouard-Bourleaux, 33140 Villenave-d'Ornon
// jean-pascal.goutouly@inrae.fr

GRAVELINE NINA, UMR Innovation, INRAE, 2 place Viala 34060 Montpellier // nina.graveline@inrae.fr

HANNIN HERVÉ, Moisa, Institut Agro, 2 place Viala, 34060 Montpellier // herve.hannin@supagro.fr

HOSSARD LAURE, UMR Innovation, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier // laure.hossard@inrae.fr

ISAMBERT CÔME, USC INRAE Grappe, École supérieure des agricultures, 55 rue Rabelais, 49007 Angers // c.isambert@groupe-esa.com

JOURDES MICHAEL, UMR 1366 Œnologie, université de Bordeaux, INRAE, Bordeaux Sciences Agro, ISW, 33140 Villenave-d'Ornon // michael.jourdes@u-bordeaux.fr

LACOMBE THIERRY, UMR 1334 AGAP, INRAE, Institut Agro, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 05 // thierry.lacombe@supagro.fr

LAGALLE LOÏC, SEMAE, 29 rue Georges Morel, 49070 Beaucazé // loic.lagalle@semae.fr

LA JEUNESSE ISABELLE, UMR Citeres, Maison des sciences de l'homme, 33 allée de Lesseps BP 60449, 37204 Tours // isabelle.lajeunesse@univ-tours.fr

LAUNAY MARIE, US AgroClim, INRAE, 228 route de l'Aérodrome, 84914 Avignon Cedex 9 // marie.launey@inrae.fr

LE ROUX RENAN, US AgroClim, INRAE, 228 route de l'Aérodrome, 84914 Avignon Cedex 9 // renan.le-roux@inrae.fr

LEVRAULT FRÉDÉRIC, Chambre régionale d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine, 2133 route de Chauvigny, Agropole – CS 45002, 86550 Mignaloux-Beauvoir // frederic.levrault@na.chambagri.fr

MARCHAL CÉCILE, UE de Vassal, INRAE, 34340 Marseillan // cecile.marchal@inrae.fr

MARGUERIT ÉLISA, EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISW, 33140 Villenave-d'Ornon // elisa.marguerit@agro-bordeaux.fr

MÉROT ANNE, UMR Absys, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier // anne.merot@inrae.fr

MÉTAY AURÉLIE, UMR Absys, Institut Agro Montpellier, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// aurelie.metay@supagro.fr

MÉTRAL RAPHAËL, UMR Absys, Institut Agro Montpellier, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// raphael.metral@inrae.fr

MOREL MARINE, EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISVW,
33140 Villenave-d'Ornon // marine.morel@inrae.fr

MOURET JEAN-ROCH, UMR SPO, INRAE, Institut Agro, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// jean-roch.mouret@inrae.fr

NAULLEAU AUDREY, UMR Innovation, INRAE, Cirad, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// audrey.naulleau@cirad.fr

NEETHLING ETIENNE, USC INRAE Grappe, École supérieure des agricultures,
55 rue Rabelais, 49007 Angers // e.neethling@groupe-esa.com

NEVEU PASCAL, UMR Mistea, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier // pascal.neveu@inrae.fr

NOUGIER MARC, UMR Innovation, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// marc.nougier@gmail.com

OLLAT NATHALIE, EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISVW,
33140 Villenave-d'Ornon // nathalie.ollat@inrae.fr

PÉRÈS STÉPHANIE, université de Bordeaux, Sciences Agro, INRAE, CNRS, ISVW, UMR BSE 6060,
33600 Pessac // stephanie.peres@agro-bordeaux.fr

PETITJEAN THÉO, UMR EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISVW,
210 ch. de Leysotte, 33140 Villenave-d'Ornon // theo.petitjean@univ-rennes2.fr

PIERI PHILIPPE, UMR EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISVW,
210 ch. de Leysotte, 33140 Villenave-d'Ornon // philippe.pieri@inrae.fr

PONS ALEXANDRE, (1) UMR 1366 Œnologie, université de Bordeaux, INRAE, Bordeaux Sciences
Agro, ISVW, 33140 Villenave-d'Ornon ; (2) Seguin Moreau France, ZI Merpins, BP 94,
16103 Cognac // alexandre.pons@u-bordeaux.fr

PRÉVOT LAURENT, UMR Lisah, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier // laurent.prevot@inrae.fr

QUÉNOL HÉRVÉ, UMR LETG, CNRS, Université Rennes 2, Place Le Moal, 35043 Rennes
// herve.quenol@univ-rennes2.fr

QUIQUEREZ AMÉLIE, UFR SVTE, UMR Artheis, Université de Bourgogne, 6 bd Gabriel,
21000 Dijon // amelie.quiquerez@u-bourgogne.fr

RENAUD-GENTIÉ CHRISTEL, USC INRAE Grappe, École supérieure des agricultures,
55 rue Rabelais, 49007 Angers // c.renaud@groupe-esa.fr

ROLAND AURÉLIE, UMR SPO, université de Montpellier, INRAE, Institut Agro, 2 place Viala,
34060 Montpellier // aurelie.roland@supagro.fr

SABLAYROLLES JEAN-MARIE, UMR SPO, INRAE, Institut Agro, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// jean-marie.sablairolles@inrae.fr

SAMSON ALAIN, UE Pech Rouge, INRAE, 11430 Gruissan // alain.samson@inrae.fr

SAURIN NICOLAS, UE Pech Rouge, INRAE, 11430 Gruissan // nicolas.saurin@inrae.fr

SCHULTZ HANS-REINER, université de Geisenheim, Von-Lade-Str. 1, D-65366 Geisenheim,
Allemagne // hans.reiner.schultz@hs-gm.de

SIMONNEAU THIERRY, LEPSE, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier
// thierry.simmonneau@inrae.fr

TEISSÈDRE PIERRE-LOUIS, UMR 1366 Œnologie, université de Bordeaux, INRAE, Bordeaux Sciences Agro, ISW, 33140 Villenave-d'Ornon // pierre-louis.teissedre@u-bordeaux.fr

TEMPÈRE SOPHIE, UMR Œnologie, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISW, 210 ch. de Leysotte, 33140 Villenave-d'Ornon // sophie.tempere@u-bordeaux.fr

THIBON CÉCILE, UMR 1366 Œnologie, université de Bordeaux, INRAE, Bordeaux Sciences Agro, ISW, 33140 Villenave-d'Ornon // cecile.thibon@u-bordeaux.fr

THIS PATRICE, UMR 1334 Agap, INRAE, Institut Agro, avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 05 // patrice.this@inrae.fr

TOUZARD JEAN-MARC, UMR Innovation, INRAE, 2 place Viala, 34060 Montpellier // jean-marc.touzard@inrae.fr

VAN LEEUWEN CORNELIS, UMR EGFV, université de Bordeaux, Bordeaux Sciences Agro, INRAE, ISW, 210 ch. de Leysotte, 33140 Villenave-d'Ornon // kees.vanleeuwen@agro-bordeaux.fr

ZAVLYANOVA MARIA, UMR LETG, CNRS, Université Rennes 2, place Le Moal, 35043 Rennes // maria.zavlyanova@outlook.com

Crédits de la couverture

Première de couverture :

- photo de gauche : Mourvèdre : © Éric Lebon (INRAE).
- photo du milieu : © Nathalie Ollat.
- photo de droite : raisin blanc de Chenin : © Étienne Neethling.
- photo du bas : de la bouteille au verre : © New Africa (Adobe Stock n° 270040033).

Quatrième de couverture :

- photo du haut : vigne flétrie par la sécheresse à l'automne en Castille (Espagne) : © Q (Adobe Stock n° 226837096).
- photo du milieu : vignoble inondé : © bianca (Adobe Stock n° 89044587).
- photo du bas : vignoble sous le gel : © Kathleen Perdue (Adobe Stock n° 138009991).

Responsable éditoriale : Véronique Vétó

Coordination de l'édition : Anne-Lise Prodel

Édition : Mickaël Legrand

Réalisation de la maquette, des figures et mise en page : Hélène Bonnet

Réalisation de la 1^{re} de couverture : Gwendolin Butter

Achévé d'imprimer en mars 2024 par ISlprint (France)

N° d'impression :

Dépôt légal : mars 2024



Le changement climatique a de nombreux effets sur la vigne, dont un développement plus précoce conduisant éventuellement à une plus grande vulnérabilité aux gelées de printemps et à une avancée certaine de la période de maturation des raisins.

Par ailleurs, des événements climatiques extrêmes de plus en plus intenses, comme les vagues de chaleur ou des pluies torrentielles, causent des dégâts importants. Les stress hydriques – plus prononcés dans le sud de la France – ont des effets marqués sur les rendements. Tous les vignobles français sont concernés. En conséquence, les caractéristiques des vins se modifient avec plus d'alcool, des baisses d'acidité et des modifications aromatiques. En parallèle, de nouveaux territoires deviennent favorables à la plantation de la vigne.

Face à ces enjeux, la clé est de s'adapter plus rapidement. Mais quelles sont les voies à suivre et quelles décisions prendre, que ce soit aux échelles locales ou nationale ?

Après dix ans de recherches sur l'adaptation de la filière Vigne et vin française au changement climatique, le projet Laccave, porté par INRAE, s'est achevé en 2021. Cet ouvrage synthétise les résultats en explorant les leviers d'action possibles : nouveaux cépages, amélioration de la gestion du sol, de l'eau et des modes de conduite, réorganisation du territoire, innovations œnologiques, nouvelles réglementations... Il offre une vision systémique et stratégique qui montre comment ces actions se déclinent à travers des démarches participatives à différents niveaux, du viticulteur jusqu'à la politique climat du secteur.

Cet ouvrage de référence s'adresse principalement aux professionnels de la filière, aux enseignants-chercheurs et aux étudiants.

Agronome de formation, **Nathalie OLLAT** est spécialiste de la physiologie de la vigne. Directrice de l'UMR Écophysiologie de la vigne à Bordeaux, ses recherches portent sur les porte-greffes et le système racinaire, ainsi que sur les interactions avec l'environnement.

Jean-Marc TOUZARD est agronome de formation et économiste. Directeur de l'UMR Innovation à Montpellier, il est spécialiste des processus d'innovation en agriculture, pour contribuer en particulier à l'adaptation au changement climatique.

éditions
Quæ

Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

CCCE
LACC
CAVE
C

INRAE

40 €

ISBN : 978-2-7592-3796-8



9 782759 237968

Réf. : 02909