

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET TERROIRS VITICOLES

Hervé Quénot
Coordonnateur



**TEC
& DOC**

Lavoisier

Changements climatiques et territoires viticoles

Hervé Quénol

Coordonnateur



www.editions.lavoisier.fr

Chez le même éditeur

Analyses et décisions en œnologie : Guide pratique du laboratoire et de la cave
C. Bonder, 2014

Manuel de viticulture
A. Reynier, 11^e éd., 2011

Les climats sur les vignobles de France
R.-P. Dubrion, 2010

Traité de viticulture de terroir : Comprendre et cultiver la vigne pour produire un vin de terroir
R. Morlat, 2010

Le champagne : De la tradition à la science
B. Duteurtre

Références Vigne : Références technico-économiques de systèmes de conduite de la vigne
J.-P. Roby, C. Van Leeuwen, É. Marguerit, 2^e éd., 2008

Erysiphe necator
M.-F. Corio-Costet, Coll. Monographies de microbiologie, 2007

Cépages et vignobles de France. Tome 3 : Les vignobles de France.
P. Galet, Volume 1 (2004), volume 2 (2006)

Le risque grêle en agriculture
F. Vinet, 2000

Direction éditoriale : Emmanuel Leclerc

Édition : Solène Le Gabellec

Fabrication : Estelle Perez

Couverture : Patrick Leleux PAO (Caen)

© 2014, Lavoisier, Paris

ISBN : 978-2-7430-1575-6

Liste des auteurs

Rob Agnew
Plant & Food Research
Ltd
Wine Research Centre
Blenheim
Nouvelle-Zélande

Carla Aruani
Departamento de
Estudios Enológicos y
Sensoriales
INV
Mendoza
Argentine

Gérard Barbeau
UVV
INRA
Angers
France

Douglas Bardsley
Dept. Geography,
Environment and
Population
University of Adelaide
Adelaide
Australie

Gérard Beltrando
UMR 8586 (PRODIG)
Université Paris-
Diderot
Paris
France

Benjamin Bois
UMR6282
Biogéosciences/IUVV
Université de
Bourgogne
Dijon
France

Valérie Bonnardot
UMR6554 LETG
Université Rennes 2
Rennes
France

Cyril Bonnefoy
UMR6554 LETG
Université Rennes 2
Rennes
France

Elodie Briche
IFAECI 3351 CNRS
CIMA
Buenos Aires
Argentine

David Brosset
Ecole Navale de Brest
IUEM
Plouzané
France

Victoria Carey
Department of
Viticulture and
Oenology
Stellenbosch University
Afrique-du-Sud

Guy Cautenet
LAMP-CNRS/OPGC
Université Blaise-
Pascal
Clermont-Ferrand
France

Sylvie Cautenet
LAMP-CNRS/OPGC
Université Blaise-
Pascal
Clermont-Ferrand
France

Zelmari Coetzee
Department of
Viticulture and
Oenology
Stellenbosch
University
Afrique du Sud

Michel Déqué
UMR3589 CNRM-
GAME
CNRS/Météo France
Toulouse
France

Vincent Dubreuil
UMR6554 LETG
Université Rennes 2
Rennes
France

Wilfried Endlicher
Institute of Geography
Humboldt-Universität
Berlin
Allemagne

Milka Ferrer
Facultad de Agronomía
Universidad de la
República Montevideo
Uruguay

Mercedes Fourment
Facultad de Agronomía
Universidad de la
República Montevideo
Uruguay

Jean-Pierre Gaudillère
UMR1287EGFV
INRA-ISVV
Villenave d'Ornon
France

Eila Gendig
Centre for
Atmospheric Research
University of
Canterbury
Christchurch
Nouvelle-Zélande

Etienne Goulet
IFVV
Pôle Val de Loire-
Centre
Beaucouzé
France

Matthieu Grassin
Bodega Alta Vista
Lujan de Cuyo
Argentine

Dominique Guyon
UMR1287EGFV
INRA-ISVV
Villenave d'Ornon
France

Daniel Joly
UMR6049 THEMA
CNRS
Université de Franche-
Comté
Besançon
France

Marwan Katurji
Centre for
Atmospheric Research
University of
Canterbury
Christchurch
Nouvelle-Zélande

IV Changement climatique et territoires viticoles

Sébastien Kervern UMR6554 LETG CNRS IUEM Plouzané France	Amber Parker The New Zealand Institute for Plant & Food Research Christchurch Nouvelle-Zélande	Hervé Quénot UMR6554 LETG CNRS Université Rennes 2 Rennes France Claudia Quini, INV OIV Mendoza Argentine	Andrew Tait National Institute for Water and Atmospheric Research Wellington Nouvelle-Zélande
Anne Laure Lereboullet UMR 8586 (PRODIG) Université Paris- Diderot Paris France	Jocelyne Perard Chaire Unesco « Culture et traditions du vin » IUVV Université de Bourgogne Dijon France	Séverine Roger UVV INRA Angers France	Cyril Tissot UMR6554 LETG CNRS IUEM Plouzané France
Renan Leroux UMR6554 LETG Université Rennes 2 Rennes France	Philippe Pieri UMR1287EGFV INRA-ISVV Villenave d'Ornon France	Mathias Rouan UMR6554 LETG CNRS IUEM Plouzané France	Jean Marc Touzard UMR951 Innovation INRA-SAD Montpellier France
Malika Madelin UMR 8586 (PRODIG) Université Paris- Diderot Paris France	Laura Pinson Bodega Alta Vista Lujan de Cuyo Argentine	Bernard Seguin INRA-Avignon Site Agroparc Avignon France	Laure Trapateau UVV INRA Angers France
Liviu Mihai Irimia Facultatea de Horticultura USAMV Iasi Roumanie	Olivier Planchon UMR6554 LETG CNRS Rennes France	Sylvie Sicard UVV INRA Angers France	Mike Trought Plant & Food Research Ltd Marlborough Wine Research Centre Blenheim Nouvelle-Zélande
Etienne Neethling UMR6554 LETG UVV-INRA Angers France	Marcela Polimeni Facultad de Filosofia y Letras, Universidad Nacional de Cuyo Mendoza Argentine	Iman Soltanzadeh Centre for Atmospheric Research University of Canterbury Christchurch Nouvelle-Zélande	Patriche Cristian Valeriu Romanian Academy Iasi Roumanie
Nathalie Ollat UMR1287EGFV INRA-ISVV Villenave d'Ornon France	Stuart Powell Centre for Atmospheric Research University of Canterbury Christchurch Nouvelle-Zélande	Andrew Sturman Centre for Atmospheric Research University of Canterbury Christchurch Nouvelle-Zélande	Cornelis Van Leeuwen UMR1287EGFV Bordeaux Sciences Agro Gradignan France
Hugo Ortiz INV Mendoza Argentine			Peyman Zavar-Reza Centre for Atmospheric Research University of Canterbury Christchurch Nouvelle-Zélande

Table des matières

Préface	13
Bernard SEGUIN	
Introduction	17
Chapitre 1. Terroirs viticoles et changement climatique : du global au local	21
Hervé QUÉNOL	
1.1. Relation vigne/climat : un bon indicateur du changement climatique	22
1.2. Les aires viticoles futures et la question de l'adaptation	26
1.3. Les terroirs viticoles	30
1.4. Les échelles spatiales/terroirs viticoles	31
1.5. Une analyse climatique à échelle fine dans les climats viticoles mondiaux	34
Chapitre 2. Méthodes d'analyse et de modélisation agroclimatique du changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles	37
Hervé QUÉNOL, Cyril BONNEFOY, Valérie BONNARDOT, Gérard BARBEAU, Etienne NEETHLING, Séverine ROGER, Malika MADELIN, Sylvie CAUTENET et Renan LEROUX	
2.1. Les observations agroclimatiques	37
2.1.1. Les mesures météorologiques	37
2.1.2. Les mesures agronomiques. Méthodologie en adéquation avec les mesures météorologiques	42

6 Changement climatique et terroirs viticoles

2.1.3. Les indices agroclimatiques adaptés à la viticulture.	67
2.2. Des méthodes de modélisation climatique adaptées aux échelles locales.	72
2.2.1. La modélisation climatique et les modèles climatiques.	73
2.2.2. Les modèles du Groupe d'experts intergouvernemental pour l'étude du climat (GIEC)	77
2.2.3. Les scénarios du 5 ^e rapport du GIEC	81
2.2.4. La modélisation climatique régionalisée	82
2.2.5. Utilisation de la modélisation atmosphérique méso-échelle en milieu viticole.	84
2.2.6. L'interpolation spatiale de données	87

**Chapitre 3. Variabilité climatique et changement climatique
à l'échelle des vignobles mondiaux.**

Hervé QUENOL, Olivier PLANCHON et Vincent DUBREUIL	91
3.1. Changement climatique dans les vignobles mondiaux : observations et tendances	92
3.1.1. Une tendance généralisée au réchauffement avec une forte variabilité spatiale et temporelle	93
3.1.2. Une variabilité saisonnière	95
3.2. Evolution des types de climats en Europe d'après la classification de W. Köppen entre 1976-2000 et 2076-2100 suivant les scénarios de changement climatique	99
3.2.1. Données et méthodes.	100
3.2.2. Une variabilité des types de climats en fonction des régions viticoles européennes	104
3.2.3. Premiers signaux de changement climatique ?	109
3.3. Conclusion	113

**Chapitre 4. Dynamique spatio-temporelle du climat
de l'Europe centrale : analyse et impacts dans les régions viticoles**

Olivier PLANCHON et Wilfried ENDLICHER	115
4.1. Un cadre spatial et climatique difficile à cerner	117
4.1.1. La question des délimitations de l'Europe centrale et de la caractérisation de son climat	117
4.1.2. L'imbrication et la juxtaposition des climats régionaux et locaux	119
4.2. Méthodologie : la question des saisons	123
4.2.1. Un bref tour d'horizon historique et géographique	123

4.2.2. Des saisons naturelles aux normes intrasaisonnieres	123
4.2.3. Apport de la classification de Hess-Brezowsky pour une recherche sur les saisons	128
4.3. Coups de froid et gels tardifs : des événements à replacer dans leur contexte saisonnier et géographique	130
4.3.1. Le gel, un événement habituel au printemps en Europe centrale	130
4.3.2. Vers une différenciation régionale plus fine : la France de l'Est, porte de l'Europe centrale	132
4.3.3. Deux épisodes de gelées différents quant à leurs causes et à leurs conséquences	134
4.3.4. Schafskälte et Siebenschläfer : derniers soubresauts hivernaux au début de l'été	138
4.4. Discussion : les saisons à l'épreuve du changement climatique	143
4.4.1. Le changement climatique bouscule les « normes ».	143
4.4.2. L'appui de la phénologie.	144
4.5. Conclusion	146
Chapitre 5. Approche modélisatrice du changement climatique à l'échelle de la Champagne viticole	147
Elodie BRICHE, Gérard BELTRANDO et Hervé QUÉNOL	
5.1. Données et méthodes	149
5.1.1. Données thermiques de la station de référence « Reims-Courcy »	149
5.1.2. Données thermiques du modèle ARPEGE-Climat (RETIC).	150
5.1.3. Indices bioclimatiques et extrêmes thermiques	151
5.2. Résultats.	151
5.2.1. Evolutions des indices de Huglin et de fraîcheur des nuits (1950-2100)	151
5.2.2. Les extrêmes thermiques : impacts futurs probables pour la viticulture champenoise ?	156
5.3. Conclusion	159
Chapitre 6. Approche régionale des climats des terroirs viticoles du Val de Loire	161
Cyril BONNEFOY, Etienne NEETHLING, Sylvie SICARD, Gérard BARBEAU, Valérie BONNARDOT, Olivier PLANCHON, Malika MADELIN et Hervé QUÉNOL	
6.1. Une région viticole septentrionale...	162
6.2. Matériels et méthodes.	162

8 Changement climatique et terroirs viticoles

6.2.1. Analyse régionale des températures	162
6.2.2. Analyse régionale de la qualité des raisins	164
6.2.3. Analyse topoclimatique des températures.	165
6.2.4. Analyse des températures dans les coteaux du Layon.	165
6.2.5. Analyse agronomique dans les coteaux du Layon	166
6.3. Observations du changement climatique sur les températures et les indices bioclimatiques.	168
6.3.1. Une augmentation générale des températures depuis les années 1960.	168
6.3.2. Les indices bioclimatiques : une évolution vers des niveaux plus élevés	170
6.4. Evolution de la date de vendange et de la composition des raisins	174
6.5. Analyse des températures dans les terroirs d'Anjou	177
6.5.1. Analyse des températures de la saison végétative	177
6.5.2. Les indices bioclimatiques : deux zones climatiques représentées	179
6.6. Analyse à échelle fine de la température dans les coteaux du Layon	180
6.6.1. Une importante variabilité spatiale de la température.	180
6.6.2. Variabilité spatiale des températures durant deux évènements extrêmes	181
6.6.3. Des indices bioclimatiques contrastés	184
6.6.4. Variabilité spatiale du comportement de la vigne	186
6.7. Discussion et conclusion	187

Chapitre 7. Zonage climatique de l'aire de production des vins de Bordeaux basé sur la température.

Incidences sur la phénologie de la vigne 189

Benjamin BOIS, Daniel JOLY, Philippe PIERI, Jean-Pierre GAUDILLIÈRE,
Dominique GUYON et Cornelis VAN LEEUWEN

7.1. Données et méthodes	191
7.1.1. Région d'étude	191
7.1.2. Données climatiques	193
7.1.3. Données phénologiques	194
7.1.4. Modèle phénologique et indices agroclimatiques	194
7.1.5. Interpolation spatiale de la température	195
7.2. Résultats et discussion	202
7.2.1. Comparaison des méthodes d'interpolation des températures au pas de temps quotidien	202
7.2.2. Validation de l'interpolation des indices agroclimatiques	204
7.2.3. Zonage agroclimatique de la Gironde viticole	207
7.3. Conclusion	214

Chapitre 8. Variabilité topoclimatique et phénologique des terroirs de la montagne de Corton (Bourgogne)	215
Malika MADELIN, Benjamin BOIS et Hervé QUENOL	
8.1. Les terroirs viticoles de la montagne de Corton en Bourgogne	216
8.2. Implantation d'un réseau d'observations thermiques et phénologiques à une échelle fine	217
8.2.1. La base de données topographique	217
8.2.2. Les mesures thermiques à hauteur de la vigne	218
8.2.3. Les mesures climatiques par des stations météorologiques	220
8.2.4. Les mesures phénologiques	221
8.3. Variabilités spatiales et temporelles du vent, fortement marquées par la topographie et le phénomène de brises.	221
8.4. Variabilités spatiales des températures minimales et maximales : l'exemple de mai 2011	223
8.5. Apport thermique en fin de cycle végétatif, confirmé partiellement par les observations phénologiques	225
8.6. Conclusion	227
Chapitre 9. Vague de froid européenne de février 2012 et impacts dans les vignobles de Cotnari (Roumanie)	229
Liviu IRIMIA, Cristian PATRICHE, Olivier PLANCHON et Hervé QUENOL	
9.1. Site, données et méthodes : le vignoble de Cotnari	230
9.1.1. Une analyse climatique multiscalaire	230
9.1.2. Des observations des dommages liés au gel dans le vignoble de Cotnari	233
9.2. Déroulement de la vague de froid et régionalisation de ses impacts.	233
9.3. Impacts thermiques en Moldavie et en République de Moldavie	234
9.4. Impacts comparés le long du 47 ^e parallèle et dans les régions viticoles	238
9.5. Une forte relation entre la répartition des températures minimales et les dommages sur la vigne	239
9.6. Conclusion	243
Chapitre 10. Changement climatique et variabilité spatiale des températures à fine échelle dans les vignobles de Stellenbosch (Afrique du Sud)	245
Valérie BONNARDOT, Victoria CAREY, Sylvie CAUTENET, Malika MADELIN, Zelmari COETZEE et Hervé QUENOL	
10.1. Site, données et méthodes	246
10.2. Principaux résultats	250

10 Changement climatique et terroirs viticoles

10.2.1. Les mesures thermiques à échelles fines : de forts contrastes thermiques	250
10.2.2. Modélisation climatique	253
10.2.3. Interaction climat/vigne (Sauvignon blanc) en Afrique du Sud	259
10.3. Conclusion	264

**Chapitre 11. Mesures et modélisation de la variabilité climatique
à l'échelle des vignobles de Nouvelle-Zélande** 265

Andrew STURMAN, Mike TROUGHT, Hervé QUÉNOL, Peyman ZAWAR-REZA,
Andrew TAIT, Rob AGNEW, Iman SOLTANZADEH, Stuart POWELL,
Amber PARKER, Marwan KATURJI et Eila GENDIG

11.1. Viticulture en Nouvelle-Zélande.	266
11.2. Stratégie de recherche	269
11.3. Les variations de température récentes	270
11.4. Un réseau de mesures agroclimatique adapté aux vignobles	275
11.5. Modélisation climatique à haute résolution	275
11.6. Analyse et modélisation bioclimatique	282
11.7. Conclusion	288

**Chapitre 12. Changement climatique dans les vignobles
d'Amérique du Sud** 289

Hervé QUÉNOL, Carla ARUANI, Mercedes FOURMENT, Laure TRAPATEAU,
Matthieu GRASSIN, Elodie BRICHE, Claudia QUINI, Hugo ORTIZ, Milka FERRER,
Gérard BARBEAU, Etienne NEETHLING, Laura PINSON et Marcela POLIMENI

12.1. Changement climatique et viticulture en Uruguay	290
12.1.1. Viticulture et climat en Uruguay	290
12.1.2. Le changement climatique en Uruguay et ses impacts sur le Tannat.	291
12.1.3. La variabilité du climat actuel dans le sud de l'Uruguay	292
12.2. Changement climatique et viticulture en Argentine	295
12.2.1. Les régions viticoles argentines	295
12.2.2. Climat et évolution des indices bioclimatiques en Argentine	297
12.2.3. Changement climatique et viticulture dans les provinces de San Juan et de Mendoza	300
12.2.4. Variabilité spatiale des températures à échelles fines	303
12.3. Conclusion	313

Chapitre 13. Modélisation méso-échelle du changement climatique : le cas des vignobles français	315
Valérie BONNARDOT, Sylvie CAUTENET, Guy CAUTENET, Michel DÉQUÉ et Hervé QUÉNOL	
13.1. Données et méthode	316
13.2. Résultats	319
13.2.1. Température minimale du mois d'avril	319
13.2.2. Température maximale du mois de juillet	323
13.2.3. Résultats des simulations méso-échelle par rapport aux sorties ARPEGE_ RETIC	327
13.3. Conclusion	330
 Chapitre 14. Modélisation des activités viticoles sous contraintes climatiques	 331
Cyril TISSOT, Etienne NEETHLING, Mathias ROUAN, Sébastien KERVERN, David BROSSET et Hervé QUÉNOL	
14.1. Matériels et méthodes	332
14.1.1. Elaboration d'une base de connaissance	333
14.1.2. Construction d'un modèle multi-agents	334
14.2. Simulations	341
14.2.1. Déroulement des simulations	341
14.2.2. Contrôle des paramètres, évaluation des résultats	343
14.3. Conclusion et perspectives	344
 Chapitre 15. Les méthodes d'adaptation au changement climatique	 347
Gérard BARBEAU, Etienne GOULET, Etienne NEETHLING, Nathalie OLLAT et Jean-Marc TOUZARD	
15.1. La variabilité, source potentielle d'adaptation	349
15.2. Adaptations des pratiques à court terme	352
15.2.1. Au niveau de la parcelle	352
15.2.2. Au niveau de l'exploitation	356
15.2.3. Au niveau des petites zones de production	361
15.3. Adaptation des pratiques à moyen terme	362
15.4. Adaptation des pratiques à plus long terme	370

Chapitre 16. L'adaptation multiforme des terroirs viticoles au changement climatique : un cas d'étude comparative France (Roussillon)/Australie (McLaren Vale)	377
Anne-Laure LEREBoullet, Gérard BELTRANDO et Douglas BARDSLEY	
16.1. La vulnérabilité de la viticulture méditerranéenne face au changement climatique	377
16.2. Le caractère systémique de la vulnérabilité et de l'adaptation	380
16.3. Cas d'étude : une comparaison France-Australie	382
16.4. Données et méthode	386
16.4.1. Données climatiques	386
16.4.2. Entretiens semi-dirigés	387
16.5. Exposition à un climat plus chaud, avec des précipitations plus incertaines (1956-2060)	388
16.6. Impacts récents et stratégies d'adaptation existantes	391
16.6.1. Des impacts importants pour les producteurs français et australiens	391
16.6.2. Stratégies d'adaptation existantes : une vue à court terme ?	394
16.7. Capacité d'adaptation d'ici 2060 : moteurs et facteurs limitants	396
16.7.1. Les freins à l'adaptation	397
16.7.2. Facteurs favorisant l'adaptation, ou les façons d'améliorer le capital financier et la motivation à s'adapter	399
16.8. Conclusion	402
Conclusion	405
Jocelyne PÉRARD	
Bibliographie	409
Index	441

Préface

Vigne et climat : le lien étroit est tellement bien établi à travers les variations annuelles exprimées par les millésimes qu'il n'est pas besoin d'études savantes pour convaincre de sa réalité. Pas plus que du rôle primordial de ce même climat pour fixer les limites géographiques qu'il impose à la culture de la vigne et, à l'intérieur de celles-ci, définir les caractéristiques dominantes des grandes régions viticoles. Alors, lorsqu'au début de ce XXI^e siècle, l'interrogation sur l'éventualité d'un changement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre est passée d'un statut de scénario virtuel relevant plutôt de la science-fiction à celui d'une projection hautement vraisemblable faisant quasiment consensus au sein de la communauté scientifique des climatologues, les interrogations sur l'avenir de la vigne se sont faites jour assez vite pour le plus grand plaisir des médias. Il faut dire que le sujet interpelle facilement le grand public, bien au-delà du cercle des connaisseurs, en tout cas dans les pays qui bénéficient d'une tradition ancienne en viticulture. Et les premiers travaux sur l'impact possible de ce changement climatique ont vite établi que c'était justement cette tradition qui pouvait être remise en question : aussi bien les limites géographiques, pourtant considérées comme immuables dans l'esprit collectif, que les caractéristiques majeures des grandes régions viticoles qui sont susceptibles d'être modifiées en profondeur par des ordres de grandeur du réchauffement pouvant atteindre les 5 à 6 °C à la fin du siècle. Les premières analyses simplistes à large échelle n'ont pas été démenties par les travaux de modélisation plus fins à l'échelle de la parcelle, et ceci d'autant plus que les premiers effets du réchauffement constaté depuis la fin des années 1980 ont pu être observés sur le terrain malgré sa valeur encore modeste, de l'ordre de 1 °C, au travers de l'avancée des dates de vendange, ainsi que des caractéristiques de celles-ci (principalement hausse du taux de sucre et baisse de l'acidité, même si le poids respectif du climat et de l'amélioration des techniques culturales est encore en discussion).

L'impact du changement climatique est donc reconnu comme un enjeu majeur pour l'avenir de la vigne, et il fait l'objet de nombreux travaux de recherche, d'abord pour en préciser ses contours à travers des exercices de projection bien documentés, ensuite pour en définir les pistes d'adaptation qu'il sera nécessaire de mettre en œuvre. C'est vrai pour la vigne comme pour toutes les productions agricoles, et la progression sensible des limites septentrionales maïs-grain en Europe ou l'augmentation présente du rendement de la betterave dans le Nord de la France appellent à mobiliser les mêmes connaissances et les mêmes outils. Sauf que le lien au local est inexistant pour ces productions et primordial pour la vigne à travers ses terroirs, étroite imbrication du sol, des techniques culturales, de la tradition et du climat local. Prédire que la culture de la vigne prendra de l'essor en Angleterre, ou même en Belgique ou aux Pays-Bas, que la Tasmanie sera une terre de repli possible pour une viticulture australienne confrontée à des épisodes de plus en plus sévères de canicule et de sécheresse associées, ce n'est pas trop difficile, pas plus de subodorer que l'irrigation classique de la vigne à partir des eaux de fonte des glaciers des Andes sera remise en cause en Argentine ou au Chili. Bien sûr, nous allons aussi identifier la marge de résilience des systèmes classiques qui ont fait la réputation de ces terroirs, ainsi que les cépages et pratiques culturales susceptibles de permettre l'évolution nécessaire tout en sauvegardant l'essentiel. A moins, pour certains, de sauter le pas et de créer de nouveaux terroirs en tirant parti des opportunités climatiques offertes. Dans tous les cas de figure, un élément essentiel fait défaut aux connaissances nécessaires : d'un côté, les projections climatiques portent sur des échelles géographiques encore insuffisamment précises, malgré les énormes progrès de ces dix dernières années, où la résolution est passée de 250 km à 8 km, et de l'autre les simulations du fonctionnement écophysiologique de la culture portent sur l'échelle de la parcelle, avec donc une dimension élémentaire de l'ordre de 100 m.

Comblant ce creux d'échelle en abordant les échelles intermédiaires, par ailleurs étroitement imbriquées, du climat local et du microclimat est donc logiquement une des priorités à mettre en œuvre. Des travaux sur le sujet ont existé dans le passé pour caractériser les aspects topoclimatiques de culture de la vigne, et ils ont bien mis en évidence des ordres de grandeur des variations spatiales atteignant couramment les 2 à 3 °C, susceptibles donc d'entrer en compétition avec les effets attendus du changement climatique. Mais ils ne pouvaient s'appuyer que sur des mesures difficiles à mettre en œuvre et ne concernaient qu'un nombre réduit de sites ou de situations climatiques. Ils appelaient donc à être revus avec l'appui des progrès technologiques, aussi bien pour l'observation que pour la modélisation, et de s'ouvrir à un plus large éventail de situations. C'était tout l'intérêt des projets TERVICLIM, puis TERRADCLIM, présentés par Hervé Quénol au nom d'une large communauté

scientifique, par ailleurs largement ouverte à l'international. A titre personnel, j'ai beaucoup apprécié les progrès effectués dans la connaissance du climat local qui conditionne tellement la culture de la vigne mais je vous en laisse, bien sûr, juger à la lecture de cet ouvrage.

Bernard SEGUIN
Membre du GIEC
Prix Nobel de la Paix en 2007

Introduction

L'évolution actuelle et future du climat global engendre de nombreuses interrogations sur le fonctionnement des géosystèmes aux échelles locales. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local pouvant engendrer un risque pour les individus et leurs activités (inondation, brouillard, gelée, etc.). C'est le cas de la viticulture où la qualité du vin, le choix des cépages ou encore la spécificité des terroirs dépendent de caractéristiques locales (topographie, type de sol, etc.) qui vont agir sur le climat. Dans ce contexte, les impacts attendus d'un éventuel changement climatique posent un certain nombre de questions, ne serait-ce que pour améliorer l'adaptation.

Dans un contexte d'intensification des concurrences entre les pays producteurs de vins, les viticulteurs des pays traditionnels se défendent en mettant en valeur la spécificité des terroirs définis en partie par les climats locaux. La notion de terroir est, pour le viticulteur, un outil de commercialisation, car il permet d'apporter une spécificité et une identité au vin. Les professionnels viticoles sont alors demandeurs d'outils et de techniques scientifiques pour évaluer les potentialités agroclimatiques actuelles et futures, notamment à travers une meilleure connaissance des variations locales du climat afin d'adapter suffisamment tôt leurs pratiques culturelles. L'évaluation du changement climatique adapté à l'échelle du terroir (échelles fines) est donc primordiale dans l'optique de la mise en place d'une politique raisonnée d'adaptation aux modifications du climat.

Les approches de ces phénomènes à partir des modèles de circulation générale du climat (MCG) ne sont pas adaptées aux échelles fines et, de ce fait, apportent des résultats trop approximatifs. Même si de réels progrès ont été réalisés ces dernières années au niveau de la modélisation climatique régionale, aucun modèle utilisé dans un cadre opérationnel ne permet de faire une simulation du climat aux échelles locales alors que très souvent des appellations viticoles concernent des secteurs de quelques kilomètres carrés. Par exemple, l'appellation « Quart de Chaume » dans les

Coteaux du Layon s'étend sur un secteur d'environ 2 km sur 3 km. Cette appellation est définie par des caractéristiques de sol, d'exposition (principalement sud), environnementales (proximité de la rivière Le Layon) et de cépages (Chenin) spécifiques. C'est la combinaison de ces caractéristiques (plus le travail du vigneron) qui permet d'élaborer ce vin liquoreux avec sa spécificité reconnue. C'est donc à une échelle spatiale plus fine, en tenant compte des caractéristiques de surface et des capacités matérielles des viticulteurs, qu'il sera possible d'évaluer les conséquences imputables au changement climatique. Une estimation des conséquences du changement climatique à une échelle fine permettrait de mieux orienter les possibles conséquences économiques et sociales de changement.

Les programmes de recherches ANR-TERVICLIM (2008-2012)¹ et GICC-TERADCLIM (2011-2013)² ont eu pour objectif de mettre en place une méthodologie de mesures (météorologiques et agronomiques) et de modélisation spatiale du climat adaptée aux échelles fines afin de définir le climat actuel des terroirs viticoles et d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée.

Cette démarche scientifique a visé à mettre en place une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques *in situ* et sur de la modélisation spatiale du climat, permettant d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir (valeurs moyennes et extrêmes climatiques). Confrontée à des observations agronomiques (stress hydrique, phénologie, taux de sucre, taux d'alcool, etc.), l'étude météorologique a permis de déterminer le climat spécifique d'un terroir. En comblant le manque de données aux échelles fines, ce travail a permis d'affiner les connaissances sur les modifications climatiques qui pourront apparaître dans les terroirs viticoles et donc d'améliorer les estimations sur les possibles impacts économiques. Cette méthodologie a été développée et appliquée à plusieurs vignobles de renommée internationale, vignobles pour lesquels les caractéristiques climatiques jouent un rôle important sur la qualité du vin et où des expérimentations scientifiques sont menées depuis de nombreuses années. La complémentarité des sites expérimentaux (terroirs français, européens et étrangers du « Nouveau Monde ») a permis d'étudier les potentialités agroclimatiques locales des terroirs dans des conditions macroclimatiques différentes. Les résultats des mesures et de la modélisation adaptée à l'échelle des terroirs ont permis de mettre en évidence une forte variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints.

1. Programme ANR-TERVICLIM « Observation et modélisation spatiale du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique » financé par l'Agence nationale de la recherche dans la catégorie jeune chercheur.

2. Programme GICC-TERADCLIM « Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles » financé par le Groupement impact du changement climatique du MEEDM.

Au niveau des températures, les différences spatiales engendrées par les conditions locales (topographie, etc.) sont très souvent supérieures à l'augmentation de température simulée par les différents scénarios du GIEC pour les cinquante années à venir. Les vigneron s'adaptent à cette variabilité spatiale du climat qui détermine en partie les caractéristiques et la typicité de leur vin. Dans le contexte du changement climatique, cette démarche d'analyse spatiale peut être une méthode d'adaptation à l'évolution temporelle du climat notamment à court et à moyen terme.

Ce type de démarche, sur la compréhension du fonctionnement du système climatique aux échelles fines avec la mise en place de méthodes de mesures (météorologiques et agronomiques) ou des techniques de modélisation spatiale, fait inévitablement appel au savoir-faire d'autres disciplines. Cette équipe interdisciplinaire composée de géographes, d'agronomes, de physiciens de l'atmosphère et de professionnels viticoles (ingénieurs, viticulteurs, etc.) a été mise en place de manière à mettre en relation différentes compétences nécessaires pour répondre à cette problématique. Les deux programmes de recherche concernés (ANR-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM) ont été conduits en collaboration avec l'industrie viticole pour répondre aux besoins du monde vitivinicole et améliorer la connaissance des relations plante/environnement afin d'assurer la production de vins de terroirs de qualité, uniques et compétitifs sur le marché international.

Cet ouvrage, composé de seize chapitres, a pour objectif de faire le bilan des travaux menés par l'équipe internationale et pluridisciplinaire abordant l'impact du changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles :

- les deux premiers chapitres présentent un « état de l'art » des travaux concernant le climat et la viticulture puis les outils et les méthodologies mis en œuvre pour analyser et modéliser la variabilité spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles dans le contexte du changement climatique. En effet, de nombreuses études ont jusqu'alors été réalisées essentiellement à l'échelle macroclimatique voire même à l'échelle des différentes régions viticoles du monde, mais très peu sont effectuées aux échelles fines ;
- les chapitres 3 et 4 montrent une analyse de la variabilité climatique spatiale et temporelle à l'échelle des vignobles mondiaux et européens ;
- les chapitres 5 à 12 présentent les résultats issus des expérimentations agroclimatiques réalisées dans différents vignobles expérimentaux. L'objectif de cette partie est d'analyser les caractéristiques climatiques locales dans des vignobles répartis dans des espaces macroclimatiques différents ;
- les derniers chapitres consistent à montrer comment les mesures et la modélisation agroclimatique peuvent être utilisées dans une optique d'adaptation de la viticulture au changement climatique.

Chapitre 1

Terroirs viticoles et changement climatique : du global au local

La vigne est une des plantes pérennes les plus anciennes et son fonctionnement est fortement influencé par les conditions climatiques de son milieu naturel (Branas 1974, Champagnol 1984, Carbonneau *et al.* 1992, Van Leeuwen *et al.* 2004, Carey *et al.* 2008). Le réchauffement climatique a des effets très importants sur la viticulture et par conséquent sur la qualité et la typicité du vin (Bindi *et al.* 1996 ; Jones *et al.* 2004 ; Webb *et al.* 2008 ; Van Leeuwen *et al.* 2009). Plusieurs études ont démontré un réchauffement significatif au cours du siècle passé dans les différentes régions viticoles de la France et du monde (Tondut *et al.* 2006, Jones 2005). En France, la vigne a répondu à ce réchauffement par une avancée des stades phénologiques et une évolution significative de la composition des raisins (Barbeau 2007 ; Duchêne et Schneider 2005, Madelin *et al.* 2008, Jones et Davis 2000). Les dates des stades phénologiques sont avancées de deux à trois semaines et au même moment, la période entre la floraison et la maturation s'est raccourcie d'environ une semaine (Jones et Davis 2000). En Bourgogne, ce raccourcissement a été associé à une augmentation de la température maximale du mois d'août depuis 1990 (Bonnardot 1996). En revanche, le réchauffement observé dans les régions viticoles françaises n'est pas homogène dans l'espace, ni dans le temps (Pielke *et al.* 2002) et en conséquence la vigne n'est pas affectée de la même manière. Plusieurs études ont mis en évidence la variabilité du climat au sein d'une même région viticole et

ont montré les migrations probables de ces vignobles vers des zones côtières plus fraîches comme en Australie (Webb *et al.* 2007, Hall et Jones 2010), en Nouvelle-Zélande (Salinger 1987), en Afrique du Sud (Bonnardot et Carey 2008) ou en Amérique du Nord (Lobell 2006, White *et al.* 2006, Jones *et al.* 2010). Cependant les études du climat à l'échelle régionale ne sont pas suffisantes pour de telles études d'impacts. Les vignobles étant très sensibles à leur environnement (pente, orientation, proximité d'une rivière, d'un plan d'eau ou de l'océan, etc.), des études à des échelles fines doivent compléter celles d'échelles plus larges (régionales) pour permettre la prise de décision à l'échelle locale, en particulier à l'échelle de la parcelle pour la vigne.

1.1. Relation vigne/climat : un bon indicateur du changement climatique

Les limites de la culture de la vigne sont définies par des conditions climatiques spécifiques notamment en fonction de la durée de l'ensoleillement, des conditions hydriques et thermiques (Galet 2000). Par conséquent, la vigne ne peut pas être cultivée à toutes les latitudes notamment dans les secteurs où la température moyenne annuelle n'est pas assez élevée pour permettre une bonne maturation du raisin ou dans les secteurs où les extrêmes climatiques tels que le gel ou les sécheresses sont trop fréquents. Les limites latitudinales de la majorité des régions viticoles du globe sont représentées sur la figure 1.1. Ce zonage correspond aux isothermes de la température moyenne annuelle 12-22 °C (conditions thermiques favorables pour la culture de la vigne) durant la période de croissance de la vigne (hémisphère nord, d'avril à octobre ; hémisphère sud, d'octobre à avril).

Comme l'indique Seguin (2004), on peut se référer aux travaux de Rozenzweig et Hillel (1998), de Reddy et Hodges (2000), de Soussana (2001) ou encore aux rapports du GIEC (2001 et 2007) pour avoir un premier diagnostic des conséquences du changement climatique sur les productions agricoles à l'échelle mondiale. La vigne est un bon indicateur de l'évolution du climat du passé et du présent. Chuine *et al.* (2004) ont montré la relation entre les dates de vendanges et les grandes périodes climatiques avec notamment une avancée moyenne des dates de vendanges de plusieurs semaines ces cinquante dernières années. « En moyenne, sur la Côte de Beaune, les vendanges avaient lieu fin septembre au cours des années 1960-1970 ; elles ont été avancées à la mi-septembre dans les années 1990-2000 » (Chabin *et al.* 2004). Ganichot (2002) a également mis en évidence cette précocité des dates de vendange de presque un mois en cinquante ans dans la région de Châteauneuf-du-Pape.

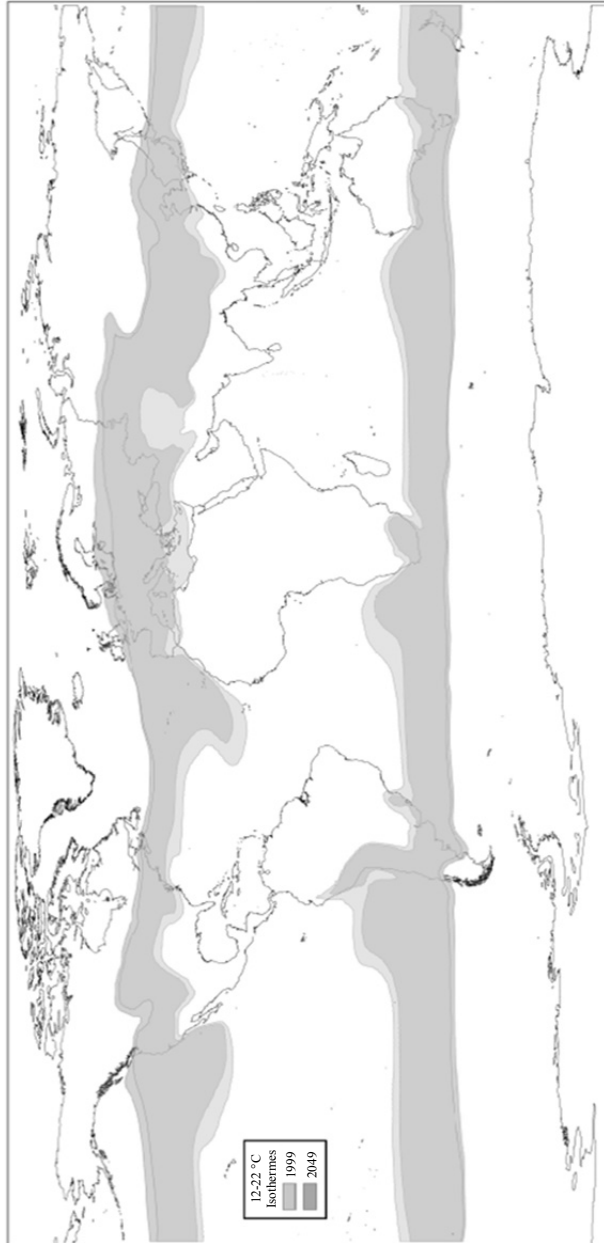


Figure 1.1. Carte des isothermes 12-22 °C pour la température moyenne durant la période de croissance de la vigne pour 1999 et 2049 (données issues d'observations et des projections futures du scénario d'émissions A1B (modèle du CCSM), (Gladstones 2005, Jone, 2006)

Les différents travaux sur la relation entre le cycle de croissance de la vigne et le climat ont permis d'aborder le thème de l'impact du changement climatique sur la viticulture. En 1996, Bonnardot mettait déjà en évidence un raccourcissement de la période floraison-récolte sur le cépage Pinot noir en Bourgogne associé à une augmentation de la température durant la période de maturation. Depuis la parution de l'article de Schultz (2000) sur l'effet de l'augmentation du gaz carbonique sur la photosynthèse de la vigne, l'évolution des dates des stades phénologiques en relation avec des indices bioclimatiques a été largement étudiée dans le monde entier (Van Leuwen 2004 ; Chuine *et al.*, 2004 ; De Cortazar, 2006 ; Webb *et al.*, 2007 ; Bellia *et al.*, 2008 ; Hall et Jones, 2008 ; Briche, 2011 ; Bonnefoy, 2013). Ainsi, les travaux de Delécolle (1999) et de Seguin (2002), portant sur plusieurs zones géographiques françaises, ont montré une avance significative dans la date de floraison pour le cépage Chasselas. Ces études ont permis de définir les potentialités agroclimatiques adaptées à une nouvelle donne climatique. Carbonneau *et al.* (1992), Schultz (2000), Tonietto *et al.* (2004) et Jones (2005) ont évalué l'impact du changement climatique par l'analyse d'indices bioclimatiques (exemple : indice héliothermique saisonnier, indice de sécheresse, indice de fraîcheur des nuits, etc.), de dates de maturité du raisin, de taux de sucre ou d'avancées phénologiques. Durant le xx^e siècle, la température moyenne annuelle a augmenté dans la plupart des régions viticoles mondiales même si l'on note une forte variabilité suivant les pays. D'un point de vue spécifiquement « thermique », Jones *et al.* (2005) ont montré que certaines régions viticoles en Europe, en Amérique du Nord et en Australie ont atteint voir dépassé leur optimum pour la culture de la vigne (figure 1.2). Dans certaines régions viticoles d'Europe du Sud ou d'Afrique du Nord, cet optimum thermique est dépassé régulièrement chaque année depuis la fin des années 1980, ce qui rend la viticulture de plus en plus compliquée.

L'augmentation de la température se caractérise notamment par une augmentation des indices bioclimatiques pouvant impliquer une modification de catégories dans les classifications de types de climats viticoles. La cartographie des indices de Huglin et de Winkler entre les périodes 1980-2009 et 1950-1979 montre une augmentation des valeurs des indices sur l'ensemble de l'Europe et de l'Afrique du Nord (Santos *et al.*, 2012). Pour certaines régions, notamment au nord et à l'est de l'Europe, l'augmentation des valeurs de ces indices est favorable et permet à ces dernières régions d'acquiescer des conditions beaucoup plus favorables pour la culture de la vigne alors que pour d'autres secteurs (principalement le sud de l'Europe), l'augmentation des valeurs des indices est plus néfaste (figure 1.3).

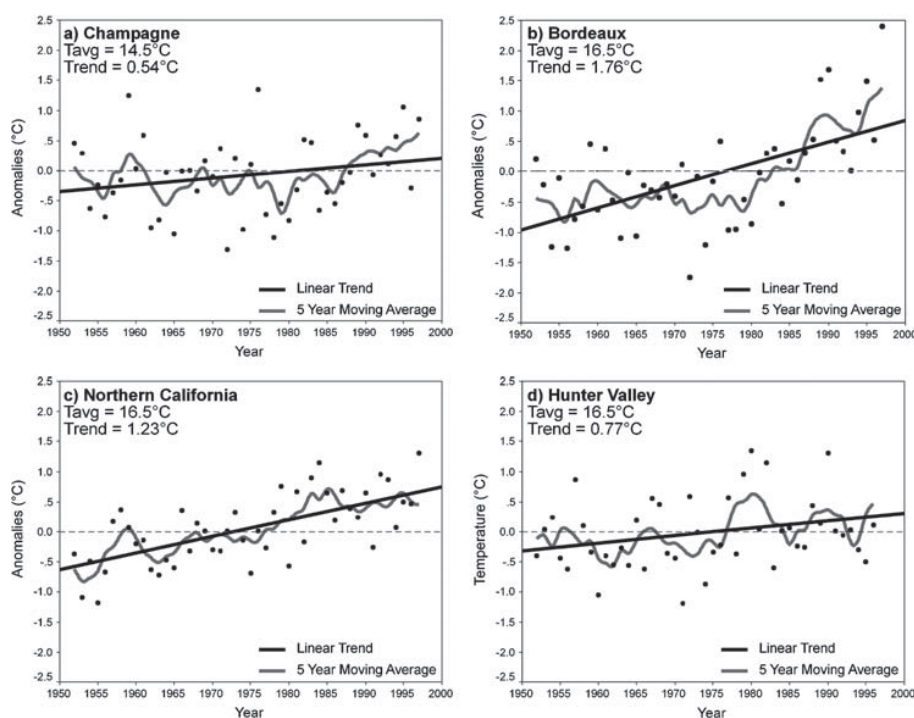


Figure 1.2. Anomalies de la température moyenne saisonnière (1950-1999) en Champagne (a), dans le bordelais (b), en Californie (c) et dans la « Hunter Valley » en Australie (d). Tav_g = température moyenne de la saison végétative de la vigne (avril-octobre dans l'hémisphère nord et octobre-avril dans l'hémisphère sud) et Trend = tendance sur 50 ans (Jones *et al.*, 2005).

Cette évolution du climat, la précocité des stades phénologiques ainsi que le raccourcissement du cycle de la vigne ont posé un certain nombre de questions sur l'impact du changement climatique sur la viticulture. En Europe de l'Ouest, l'année 2003 a été marquée par des extrêmes climatiques (gelées de printemps et canicule estivale) qui ont eu des conséquences néfastes pour la vigne notamment des dégâts liés au gel en Champagne et d'importants problèmes de stress hydrique et d'échaudage des baies dans les vignobles du sud de l'Europe (Briche *et al.*, 2011). En Australie, ce sont de longues périodes avec des températures très élevées qui ont engendré des dommages importants pour l'activité viticole australienne (Webb *et al.* 2007 ; Webb *et al.*, 2008 ; Hall et Jones, 2008 ; Webb *et al.*, 2010). D'après de nombreux scientifiques (notamment les physiciens de l'atmosphère), ces conditions climatiques marquées par des événements extrêmes seront beaucoup plus fréquentes dans le futur et auront obligatoirement un impact sur la viticulture mondiale (André *et al.*, 2004). Ceci pose

inévitavelmente la question de l'adaptation des vignobles au changement climatique, d'où la nécessité de réaliser des simulations climatiques futures.

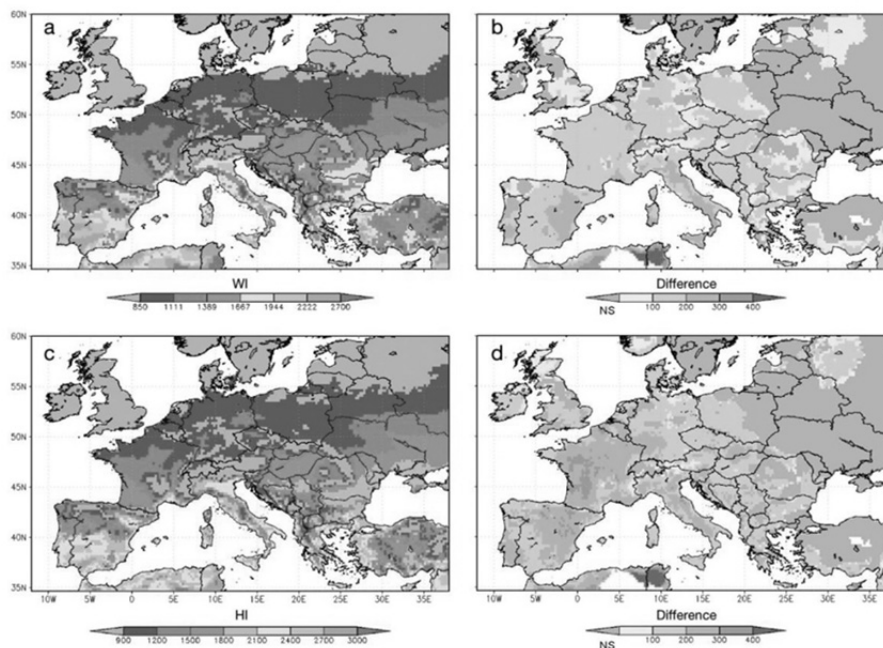


Figure 1.3. Indice de Winkler sur la période 1950-2009 (a) et différence entre les deux médianes de l'indice des périodes 1980-2009 et 1950-1979 (b). Indice de Huglin sur la période 1950-2009 (c) et différence entre les deux médianes de l'indice des périodes 1980-2009 et 1950-1979 (d), (Santos et al., 2012) (voir cahier couleur).

1.2. Les aires viticoles futures et la question de l'adaptation

Les méthodes d'adaptation de la viticulture sont différentes suivant l'intensité des modifications climatiques. Par exemple, en Europe de l'Ouest, à court et à moyen terme, les méthodes d'adaptation concernent principalement des modifications de techniques culturales. Dans les vignobles du Val de Loire, où actuellement l'augmentation moyenne de la température de 1 °C sur les trente dernières années a plutôt des conséquences favorables sur la qualité des vins, Barbeau (2007) préconise à court terme une adaptation des pratiques culturales telles que l'entretien du sol, la date et le type de taille ou des interventions sur le feuillage, etc. A plus long terme, si l'augmentation des températures moyennes est supérieure à 4-6 °C, une évolution de l'encépagement (ou de nouveaux types d'association cépage/porte-greffe), un