



HAL
open science

Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen

Audrey Naulleau

► **To cite this version:**

Audrey Naulleau. Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen. Sciences du Vivant [q-bio]. Institut Agro Montpellier; Université de Montpellier (UM), FRA, 2021. Français. NNT: . tel-03562565

HAL Id: tel-03562565

<https://hal.inrae.fr/tel-03562565>

Submitted on 9 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER
ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER**

En Ecologie Fonctionnelle et Sciences Agronomiques

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau

Portée par
Unité de recherche ABSys

**Co-construction et évaluation de stratégies
d'adaptation au changement climatique d'un
vignoble méditerranéen**

Présentée par **Audrey NAULLEAU**
Le 8 Décembre 2021

Sous la direction de **Christian GARY**
Et le co-encadrement de **Laurent PREVOT** et **Laure HOSSARD**

Devant le jury composé de

Marie-Hélène JEUFFROY	Directrice de recherche	INRAE	Rapporteure
Cornelis VAN LEEUWEN	Professeur	Bordeaux Sciences Agro	Rapporteur
Patrick AIGRAIN	Chef de service	FranceAgriMer	Examineur
Nadine ANDRIEU	Chercheuse	CIRAD	Examinatrice
Olivier THEROND	Ingénieur de recherche	INRAE	Examineur
Stéphane DE TOURDONNET	Professeur	Montpellier Supagro	Président du jury
Christian GARY	Directeur de recherche	INRAE	Directeur de thèse
Laure HOSSARD	Chargée de recherche	INRAE	Invitée



**UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER**



À force de sacrifier l'essentiel à l'urgence, on finit par oublier l'urgence de l'essentiel.

Edgar Morin, La Méthode, Ethique (2004)

Avant Propos

Cette thèse a été réalisée de Novembre 2018 à Décembre 2021 au sein de l'UMR ABSys au centre INRAE de Montpellier, dans le cadre du projet LACCAVE 2.21 (Long term Adaptation to Climate Change in Viticulture and Enology) et sous la direction de Christian Gary (INRAE, ABSys), et le co-encadrement de Laurent Prévot (INRAE, LISAH) et de Laure Hossard (INRAE, Innovation). Elle a été financée par INRAE via le métaprogramme ACCAF (Adaptation aux Changements Climatiques de l'Agriculture et des Forêts) et le département Agroécosystèmes, ainsi que par la région Occitanie. Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont fait l'objet des publications et communications scientifiques suivantes :

- **Publications dans des revues à comité de lecture**

Nauveau A., Gary C., Prévot L. et Hossard L. (2021). Evaluating Strategies for Adaptation to Climate Change in Grapevine Production—A Systematic Review. *Frontiers in Plant Science*, **11**, 2154.

Nauveau A., Christian Gary, Laurent Prévot, Victor Berteloot, Jean-Christophe Fabre, David Crevoisier, Rémi Gaudin, Laure Hossard. Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. *Environmental Modelling and Software*. (In revision)

Nauveau A., Christian Gary, Laurent Prévot, Fabrice Vinatier, Laure Hossard. How can wine-growers adapt to climate change? A participatory modeling approach in the South of France. *Agricultural Systems*. (In progress)

Fernández-Mena H., Frey H., Celette F., Garcia L., Barkaoui K., Hossard L., **Nauveau A.**, Métral R., Gary C. et Metay A. (2021), Spatial and temporal diversity of service plant management strategies across vineyards in the south of France. Analysis through the Coverage Index. *European Journal of Agronomy*, vol. 123, pp. 126:191.

- **Articles de vulgarisation scientifique**

Naulleau A., Prévot, L., Gary, C., Hossard, L. (2021). Évaluer numériquement les impacts du changement climatique au sein d'un bassin viticole pour co-construire des stratégies d'adaptation. *Agronomie, Environnement et Sociétés*,11 (2). DOI : 10.54800/rtr361.

Naulleau A., Hossard L., Gary C., Prévot P. (2021). Vignobles méditerranéens : de l'évaluation locale du changement climatique à l'identification de leviers d'adaptation *Cahier Régional Occitanie sur les changements climatiques*

- **Communications dans des congrès**

Naulleau A., Prévot L., Gary C., and Hossard L., 2020. Strategies for adapting viticulture to climate change: a participatory modeling approach within a Mediterranean catchment. *Oral presentation (online) at the 16th ESA Congress*, 1 to 3 September 2020, Sevilla, Spain

Naulleau A., Gary C., Prévot L., and Hossard L. Adapting viticulture to climate change: a participatory scenario design within a Mediterranean catchment. *Short paper accepted for oral presentation at the 14th European IFSA Symposium*, 28 March to 1 April 2022, Evora, Portugal

Naulleau A., Prévot L, Gary C, and Hossard L. Climate change impacts in a viticultural landscape in the South of France: should we extend irrigation systems? *Abstract submitted at the 7th International Symposium for Farming System Design*, 20 to 23 March 2022, Tunis, Tunis

- **Participations à des séminaires**

Naulleau A., 2020. Méthode pour la co-construction et l'évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique au sein d'un bassin versant viticole méditerranéen. Réseau MiDi : Les rendez-vous des Milieux et de la Diversité. Conférence Eau, sécheresse et adaptation de l'agriculture dans un contexte de changement climatique (5 juin 2020)

Naulleau A., 2020. Des systèmes de culture adaptés au changement climatique, co-construits et évalués avec les vignerons, *Salon Vinitech*, 1 to 3 dec 2020, Bordeaux, France

Naulleau A., Merot A., Metay A. 2021. Design and assess grapevine systems for the future to reduce pesticide use in the context of climate change. *Montpellier Vine and Wine Sciences International webinar*. Innovation Toward Sustainable viticulture and enology in a changing world, 8 and 15 June 2021

Remerciements

Trois belles années se terminent. Nombreuses ont été les personnes qui m’ont soutenue pendant cette période, autant sur l’aspect professionnel, scientifique, et humain. Merci à toutes et à tous.

Mes premiers remerciements vont à Christian GARY, Laurent PREVOT et Laure HOSSARD pour leur encadrement. Leurs conseils avisés, leurs contributions nombreuses, leurs débats mais surtout leur confiance m’ont permis de mener à bien ce travail en toute sérénité.

Je souhaite ensuite remercier Marie-Hélène JEUFFROY et Cornelis VAN LEEUWEN qui ont accepté d’évaluer ce travail en tant que rapporteur(e). Ma gratitude va aussi à Patrick AIGRAIN, Nadine ANDRIEU, Stéphane DE TOURDONNET et Olivier THE-
ROND qui ont bien voulu endosser le rôle d’examineurs(trices). Merci également aux membres du comité de thèse qui ont pris part à ce travail, François AFFHOLDER, Delphine BURGER-LEENHARDT, Thierry SIMONNEAU et Marie THIOULET-SCHOLTUS.

Je remercie ceux qui ont soutenu financièrement cette thèse. Je pense en premier lieu au métaprogramme ACCAF. Je mesure la chance pour moi d’avoir fait partie de la communauté de scientifiques et de professionnels qui participent au projet LACCAVE 2.21. Merci à tous les membres du projet que j’ai croisés durant ces années, en particulier les coordinateurs Nathalie OLLAT et Jean-Marc TOUZARD. En deuxième lieu, je remercie la Région Occitanie et le département EA de l’INRAE, qui ont participé au financement de cette thèse.

Ce travail n’aurait pas été possible sans la fidèle participation des acteurs du bassin versant du Rieutort. Je remercie Roger MARTIN, président de la cave coopérative des Coteaux du Rieutort ainsi que Nadia VAN HANJA, animatrice agro-environnementale pour le EPTB Orb et Libron, qui m’ont fait parcourir les moindres recoins du Rieutort. Merci également à Hélène LEGUEIL, technicienne de l’AOP Saint-Chinian et Marie CORBEL, directrice de l’AOP Faugères. Merci aux vigneronnes et vignerons qui ont participé aux ateliers ou bien accepté notre suivi sur leurs parcelles : Lise, Brice, Jean-Philippe, Michel, Florence, Nicolas B., Nathalie, Cédric, Nicolas M., Alain et Yannick. Merci aux participants de la chambre d’agriculture de l’Hérault, du conseil départemental,

de l'EPTB Orb et Libron, de l'IFV et de l'AOP Languedoc pour leur expertise et leurs contributions à ce travail.

Les collaborations scientifiques ont été nombreuses. En premier lieu, je remercie Jean-Christophe FABRE et David CREVOISIER qui m'ont aidé à développer le modèle sur la plateforme OpenFLUID. Sans eux, aucune projection dans le futur n'aurait été possible. Je remercie également tous les passionné(e)s de la vigne, toutes disciplines confondues : Thierry SIMONNEAU, Thierry LACOMBE, Iñaki GARCIA CORTAZAR, Aurélie METAY, Rémi GAUDIN. Chacun et chacune a su m'éclairer sur une partie du fonctionnement de la vigne. Je remercie plus particulièrement l'équipe technique de l'UMR ABSys : Yvan, Clément, Bénédicte, Jeff et Alain. Vous avez tout fait pour m'aider à explorer ce nouveau terrain d'étude. Merci à Patrick ANDRIEUX pour ses informations précieuses, à Guillaume COULOUMA et Philippe LAGACHERIE de m'avoir éclairé sur l'histoire pédologique du Rieutort et à Frédérique HUARD pour nos échanges sur l'utilisation de nos nombreuses données climatiques.

Enfin j'aimerais exprimer toute ma gratitude aux trois laboratoires qui m'ont accueillie : l'UMR ABSys pour les conditions de travail dans lesquelles j'ai pu réaliser cette thèse, les UMR LISAH et INNOVATION qui m'ont permis d'élargir mes réflexions vers d'autres horizons. Mes remerciements vont à l'ensemble des membres de ces laboratoires. J'adresse plus particulièrement mes remerciements aux doctorant(e)s et associé(e)s, que j'ai côtoyés quotidiennement : Sébastien, Guillaume, Benjamin, Esther, Thomas, Marine, Johanna, Léa, Laetitia, Nicolas, Marcos.

Hors du cadre professionnel, je suis redevable aux personnes qui de près ou de loin m'ont accompagnée pendant ce travail. Merci à ma famille et en particulier mes parents, chez qui je ne pouvais trouver meilleur ressourcement. Merci aux amis, qui ont su toujours me rappeler l'essentiel.

Enfin mes plus grands remerciements sont pour Chady JABBOUR, pour sa présence, ses encouragements, et son soutien de tous les instants.

Table des matières

Avant Propos	i
Remerciements	iii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des sigles et abréviations	xiii
Introduction générale	1
I Contexte et problématique	5
Chapitre 1 Concevoir des stratégies d’adaptation au changement climatique au sein d’un paysage viticole	7
1 Articuler changement climatique global et adaptations locales	8
1.1 Régionaliser les projections climatiques	8
1.2 Prévoir les impacts du changement climatique	11
1.3 S’adapter localement	14
2 La viticulture face au changement climatique	17
2.1 La vigne, un cas d’étude historique	17
2.2 Les impacts du changement climatique en viticulture	18
2.3 Les acteurs impliqués dans la recherche d’adaptations	20
2.4 Les limites des études actuelles	21
3 Combiner modélisation et approches participatives pour construire et évaluer des stratégies d’adaptation à l’échelle des paysages	22
3.1 La modélisation participative, une démarche au service de la conception	22
3.2 Des démarches aux objectifs multiples	23
3.3 Des outils pour combiner modélisation et participation	25
4 Définition de la problématique	27

Chapitre 2	Evaluer les adaptations au changement climatique en viticulture	29
1	Introduction	30
2	Methods	33
2.1	Article selection and analysis	33
2.2	Overview of the final selection of articles	36
3	Adapting viticulture to future water scarcity	37
3.1	Combination of long-term adaptations to increase viticultural suitability (LT)	39
3.2	Combination of short-term adaptations to enhance flexible management (ST)	42
3.3	Combination of long-term and short-term adaptations	47
4	Evaluating climate change adaptation in viticulture	50
4.1	Characterization of climate change	50
4.2	Approaches to evaluate adaptation effects	52
4.3	Evaluation scales and criteria	54
5	Discussion	55
5.1	Identifying the site-specific trade-off between adaptations	55
5.2	Insight for developing a new evaluation framework	57
II	Matériel et Méthodes	61
Chapitre 3	Cas d'étude et démarche	63
1	Cas d'étude : le bassin versant du Rieutort	64
1.1	Un bassin versant caractéristique du vignoble languedocien	64
1.2	Description des paysages	66
1.3	Description du climat	68
1.4	Identification des acteurs pour la démarche participative	69
2	Positionnement de la démarche générale	70
2.1	Présentation de la démarche générale	70
2.2	Construction du modèle	72
2.3	Test du modèle	75
2.4	Simulations	77
2.5	Récapitulatif des ateliers	79

III Résultats 81

Chapitre 4 Combiner approche participative et modélisation pour évaluer les impacts du changement climatique 83

1	Introduction	84
2	Material and methods	87
	2.1 Study area	87
	2.2 Participatory modeling approach	88
	2.3 Modeling software and representations	95
3	Results	96
	3.1 From the conceptual scheme to the simulation model	96
	3.2 Model testing	99
	3.3 Simulations under current and future climatic conditions	103
4	Discussion	106
	4.1 Model-based evaluation of climate change impacts	106
	4.2 Benefits and limitations of the participatory approach	108
5	Conclusion	109

Chapitre 5 How can wine-growers adapt to climate change? 111

1	Introduction	113
2	Material and methods	115
	2.1 A participatory modeling process in a viticultural watershed	115
	2.2 Designing adaptation strategies	116
	2.3 Model simulations and post-simulation calculations	117
	2.4 Discussion of the adaptation strategies with stakeholders	120
3	Results	121
	3.1 Adaptation measures at field scale	121
	3.2 Adaptation strategies at watershed scale	125
	3.3 Farm scale evaluation	131
4	Discussion	132
	4.1 Co-designed adaptation strategies	132
	4.2 An original method to design and assess adaptation strategies	134
	4.3 Enriching exchanges within and between groups of stakeholders	135
5	Conclusion	136

IV	Discussion Générale	137
Chapitre 6	Discussion Générale	139
1	Retour sur la démarche participative mise en place	141
1.1	Identification des acteurs et dynamique de participation	141
1.2	Les attentes vis-à-vis de la participation	143
1.3	La démarche participative vue par les participants	144
2	Discussion des résultats de la démarche participative	146
2.1	La participation comme moyen de l'étude	146
2.2	Les types de stratégies d'adaptation construites	148
2.3	Les indicateurs d'évaluation des stratégies d'adaptation	150
3	Estimation des rendements viticoles	151
3.1	Les modèles de culture pour la vigne	151
3.2	Vers des modèles multi-échelles et intégrés	154
3.3	Vers d'autres types de modèle	157
4	L'interaction modèle/participation pour élargir le champ des thématiques .	159
4.1	Les défis à relever pour combiner modélisation et participation . . .	159
4.2	S'adapter ou se transformer ?	161
	Conclusion et Perspectives	165
	Références bibliographiques	167
	Annexes	201
Annexe A	Présentation du projet LACCAVE	203
Annexe B	Matériel supplémentaire du Chapitre 2	205
Annexe C	Modifications apportées au modèle WaLIS	223
Annexe D	Bilan de la campagne de mesures 2020	231
Annexe E	Fiche de résultats du modèle à l'échelle parcelle	235
Annexe F	Présentation des scénarios climatiques	239
Annexe G	Matériel supplémentaire du Chapitre 4	245
Annexe H	Matériel supplémentaire du Chapitre 5	257

Liste des figures

Figure 1.1	Trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre décrites pour les quatre scénarios RCP	9
Figure 1.2	Evolutions de la température moyenne et des précipitations annuelles moyennes pour la région méditerranéenne	10
Figure 1.3	Quatre exemples d'impacts du changement climatique en viticulture, en fonction de quatre différentes méthodes d'évaluation . . .	13
Figure 1.4	Illustration de la manière dont l'effet de l'adaptation au changement climatique doit être calculé pour les nouvelles technologies agricoles	14
Figure 1.5	Interrelations entre échelles spatiales pour l'adaptation au changement climatique	16
Figure 1.6	Échelles de temps d'une plante pérenne	18
Figure 1.7	Extrait de l'infographie « La vigne, le vin, et le changement climatique en France » issue du projet LACCAGE	21
Figure 1.8	Classification des démarches de modélisation participative	24
Figure 1.9	Typologie des outils utilisés en modélisation participative	26
Figure 2.1	PRISMA flow diagram	34
Figure 2.2	Presentation of the article pool (n=111)	37
Figure 2.3	Number of studies that evaluate each adaptation lever	38
Figure 2.4	Technical operations on canopy and controlled processes	47
Figure 2.5	Number of articles and associated percentage of results indicating an effect of short-term and long-term adaptations on desired direction of outputs	49
Figure 2.6	Number of studies that evaluate adaptation according to the implemented approach (experimentation, modeling, expert judgement)	52
Figure 2.7	Number of studies that address one or more spatial scales in the pool of articles (n=111)	54
Figure 2.8	Number of studies that evaluate adaptation according to their evaluation indicators	55
Figure 2.9	Conceptual diagram of the spatio-temporal model needed to design and evaluate strategies for adaptation to climate change across viticultural regions	58
Figure 3.1	Caractéristiques du vignoble héraultais	65
Figure 3.2	Délimitation des trois zones du bassin versant du Rieutort	67
Figure 3.3	Trois systèmes viticoles du Rieutort	68

Figure 3.4	Localisation des stations météorologiques autour du bassin versant du Rieutort	69
Figure 3.5	Schéma général de la méthode	71
Figure 3.6	Exemple du débiaisage de la température maximale (TX) par la méthode quantile-quantile	78
Figure 4.1	Case study area	87
Figure 4.2	Participatory modeling framework	89
Figure 4.3	Numerical simulation model	91
Figure 4.4	Conceptual scheme derived from WS1 discussion	97
Figure 4.5	Grape Yield model (GraY) calibration for Syrah variety	99
Figure 4.6	Presentation of the baseline situation according to the eight production sectors defined during the second workshop	100
Figure 4.7	Simulated phenological stages and associated risk indicators	103
Figure 4.8	Mean yield evolution (and standard deviation) under two representative concentration pathways scenario	106
Figure 5.1	Description of the numerical model (A) and summary of the workflow (B)	116
Figure 5.2	Simulated effects of adaptation measures on harvest dates, mean temperatures during ripening, irrigation needs and yields	123
Figure 5.3	Desirability and feasibility and unfeasibility of adaptation measures, according to local and regional stakeholders	125
Figure 5.4	Annual irrigation needs at (A) field and (B) watershed scale, according to the three degrees of water saving strategies (WSS) in RCP 8.5	128
Figure 5.5	Grapevine production evolution in RCP 8.5 for the period 2031-2060 and 2071-2100 in comparison to the historical period (1981-2010)	129
Figure 5.6	Evaluation of the relocation strategy (RelocS) on total production volume at watershed scale	130
Figure 6.1	Classement des démarches participatives, selon l'axe (1) des objectifs, et (2) des résultats attendus (Van Asselt Marjolein and Rijkens-Klomp, 2002)	147
Figure 6.2	Typologie des scénarios selon Börjeson et al. (2006)	149
Figure 6.3	Quatre scénarios d'adaptation de la filière viticole selon l'ampleur de l'innovation et du déplacement des régions viticoles (Aigrain et al., 2016)	150
Figure 6.4	Étapes et facteurs limitants de l'élaboration du rendement de la vigne (issu de Guilpart et al. 2014)	153
Figure 6.5	Synthèse des couplages permis par la plateforme OpenFLUID aux échelles de la parcelle, de l'exploitation et du paysage	156
Figure 6.6	Classification des modèles appliqués à la viticulture selon la grille proposée par Banos (2013)	158
Figure 6.7	Différents niveaux d'adaptation au changement climatique en fonction des connaissances déjà acquises et en fonction de l'ampleur du changement climatique	162

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Voies et leviers d'adaptation de l'agriculture au changement climatique	15
Tableau 1.2	Exemples d'indicateurs agroclimatiques viticoles	19
Tableau 2.1	List of the recorded information	35
Tableau 2.2	Irrigation strategies and associated water requirements in different climate scenarios	44
Tableau 2.3	Number of studies that describe future climate according to meteorological data, climate model or stakeholders' perception	51
Tableau 3.1	Liste des modèles existants pour représenter les systèmes et paysages viticoles	74
Tableau 3.2	Objectifs et nombre de participants aux ateliers	80
Tableau 4.1	Number of representatives by type of stakeholders	89
Tableau 4.2	Simulated average and standard deviation of climatic characteristics for the central area of the Rieutort watershed	94
Tableau 4.3	Goodness-of-fit indicators of the simulations performed with the WaLIS-GraY model for the 10 experimental plots	101
Tableau 4.4	List of co-designed indicators	102
Tableau 4.5	Irrigation requirements and grape production under future climatic conditions	104
Tableau 5.1	Detailed simulation of adaptation measures at plot scale	118
Tableau 5.2	Adaptation costs	120
Tableau 5.3	Combination of adaptation measures in the four co-designed strategies	126
Tableau 5.4	Percentage of the sector surfaces engaged into adaptation for the three water saving strategies	127
Tableau 6.1	Niveau de participation des acteurs dans un processus participatif .	143
Tableau 6.2	Réponses aux questionnaires d'évaluation de la démarche participative	145
Tableau 6.3	Exemple de reformulations des questions par les acteurs au cours de la démarche	161

Liste des sigles et abréviations

ACH : Association Climatique de l'Hérault

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational

AOP : Appellation d'Origine Protégée (PDO en anglais)

CA : Chambre d'agriculture

EdS : Etats de Surfaces

EPTB : Établissement public territorial de bassin

ET₀ : Evapotranspiration de référence (Penman-Monteith)

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat

GraY : Grape Yield (modèle de rendement vigne développé dans cette thèse)

IFV : Institut Français de la vigne et du vin

IGP : Indication Géographique Protégée (PGI en anglais)

IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change*

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LACCAVE : *Long-term adaptation to climate change in viticulture and enology*

RCP : *Representative concentration pathway*

RPG : Registre Parcellaire Graphique

RU : Réservoir utile (*SWAC* : *soil water available capacity*)

SP3A : Spatialisation de Pratiques Agricoles Adaptées et acceptables

WaLIS : *WATER baLance for Intercropped Systems*

WS : *Workshop*

Introduction générale

Du premier rapport du GIEC¹ en 1990 à la publication récente du sixième rapport d'évaluation (IPCC, 2021), les connaissances scientifiques sur les causes et les impacts du changement climatique ont beaucoup progressé. Malgré son inscription dans les agendas de recherches, puis dans les agendas politiques, la lutte contre le changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre demeure insuffisante (Nations-Unis, 2021). Le changement climatique déjà engagé aura des effets inéluctables. Parmi les secteurs impactés, l'agriculture est particulièrement menacée, du fait des relations étroites entre la production agricole et les conditions environnementales. Face au réchauffement perceptible du climat, à l'annonce d'une modification du régime de précipitations et d'une intensification des événements climatiques extrêmes (canicules, inondations, sécheresses, etc.), les agriculteurs, mais aussi les décideurs politiques, doivent dès à présent trouver les adaptations nécessaires au maintien durable de l'activité agricole.

La viticulture méditerranéenne est un emblème culturel et économique particulièrement menacé. En France, le vignoble languedocien est le premier producteur de vin en volume, avec 28% de la production nationale (FranceAgriMer and CNIV, 2016). Dans l'Hérault, la vigne couvre 45% des surfaces cultivées et génère 800 millions d'euros chaque année (Département Hérault, 2019). Or cette activité économique est particulièrement sensible aux variations climatiques. D'abord, la vigne est une culture majoritairement pluviale, dont la gestion fine du déficit hydrique vise à développer les qualités organoleptiques des vins, tout en satisfaisant les objectifs de rendement (Gaudin et al., 2014). La vigne est aussi une culture pérenne dont il faut anticiper les conditions environnementales futures dès la plantation, et sur laquelle la succession pluriannuelle de stress (hydrique, thermique) peut avoir des impacts pendant plusieurs années (Guilpart et al., 2014). Enfin les conditions de températures déterminent un certain nombre de processus, phénologiques et de maturation des baies, qui conditionnent la qualité de la récolte (Tonietto and Carbonneau, 2004). Or avec une augmentation des températures prévue entre 1 et 5°C, une diminution des pluies de l'ordre de 10 à 20%, et une variabilité inter et intra-annuelle accentuée, le climat méditerranéen est amené à beaucoup évoluer d'ici la fin du XXI^{ème} siècle (Giorgi, 2006).

¹Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais pour Intergovernmental Panel on Climate Change)

Dans ce contexte, plusieurs voies d'adaptation de la viticulture, non exclusives entre elles, sont envisageables : adoption de cépages plus tardifs et plus tolérants à la sécheresse, irrigation, voire changements de localisation des vignobles (Ollat et al., 2016). Cependant, force est de constater que les préconisations pour l'adaptation des systèmes viticoles au changement climatique ne prennent que trop peu en compte la réalité locale des viticulteurs. D'une part, il y a un intérêt à développer des approches spatiales (Boiffin et al., 2014) pour représenter la diversité de systèmes viticoles qui composent le paysage (type de sol, accès à l'irrigation, production AOP ou IGP). Le contexte local devient ainsi la base de la construction de stratégies d'adaptation qui combinent dans le temps et dans l'espace différents leviers. Il convient alors d'évaluer quantitativement et à différentes échelles ces stratégies afin de mesurer des interactions, synergiques ou antagonistes, entre les effets du changement climatique (ex. raréfaction de la ressource en eau) et de changements techniques (ex. installation de l'irrigation).

D'autre part, il existe un enjeu réel à hybrider les connaissances des scientifiques et des acteurs locaux (Murgue et al., 2016) afin de construire et évaluer des stratégies d'adaptation. D'un côté, les connaissances scientifiques, principalement issues de modélisations (climatique, agronomique ou environnementale) sont importantes pour renseigner les parties prenantes² sur les futures évolutions possibles du climat et des agroécosystèmes. De façon complémentaire, les connaissances locales, qui s'expriment notamment dans le cadre de démarches participatives, peuvent permettre d'enrichir les analyses simplifiées des modèles, en favorisant une meilleure représentation de la diversité locale (Clavel et al., 2011), en explorant des alternatives réalistes (Murgue et al., 2015) et en développant de nouveaux indicateurs d'évaluation (Allain et al., 2018b). Le développement d'approches qui articulent démarche participative et modélisation est donc une voie pour la production de connaissances partagées pour la conception de systèmes viticoles adaptés, à la fois aux conditions climatiques futures et aux opportunités et contraintes locales.

Cette thèse en agronomie repose sur l'hypothèse principale que la combinaison de changements techniques à la parcelle et de leur distribution dans le paysage donnent des marges de manœuvre supplémentaires pour adapter la viticulture au changement climatique. Ce manuscrit propose une démarche de modélisation participative basée sur la co-construction et l'évaluation par un modèle, de stratégies d'adaptation spatialisées au sein d'un bassin versant viticole méditerranéen.

²Une partie prenante ("stakeholder") est défini comme un individu qui influence directement ou indirectement l'objet concerné, ou bien est impacté par les décisions liées à la gestion de cet objet (Leenhardt et al., 2012). Le terme "acteur" utilisé dans la suite du manuscrit fait référence aux "stakeholders"

Ce manuscrit est composé de quatre parties dont l'articulation est présentée en Figure 0.1. La première partie de ce manuscrit décrit le contexte dans lequel s'inscrit la problématique de la thèse. Le Chapitre 1 s'appuie sur les connaissances actuelles sur le changement climatique, ses impacts sur la production viticole et les démarches de modélisation participative pour formuler trois questions de recherche. Le cas de la viticulture, au travers de ses leviers d'adaptation et des méthodes pour les évaluer, fait l'objet d'une revue systématique (Chapitre 2). La seconde partie expose la démarche mise en œuvre, du choix de la zone d'étude à la construction d'une démarche de modélisation participative (Chapitre 3). La troisième partie est consacrée aux résultats de la thèse. Elle inclut l'évaluation des impacts du changement climatique, basée sur le développement d'un modèle *ad hoc* et d'une approche participative (Chapitre 4), suivie de la construction et de l'évaluation de stratégies d'adaptation (Chapitre 5). Pour finir, la quatrième partie s'attache à discuter la démarche mise en œuvre, en mettant l'accent sur la dynamique de participation, les progrès en termes d'estimation des rendements viticoles et les perspectives de recherche issues des interactions entre modèle et participation (Chapitre 6).

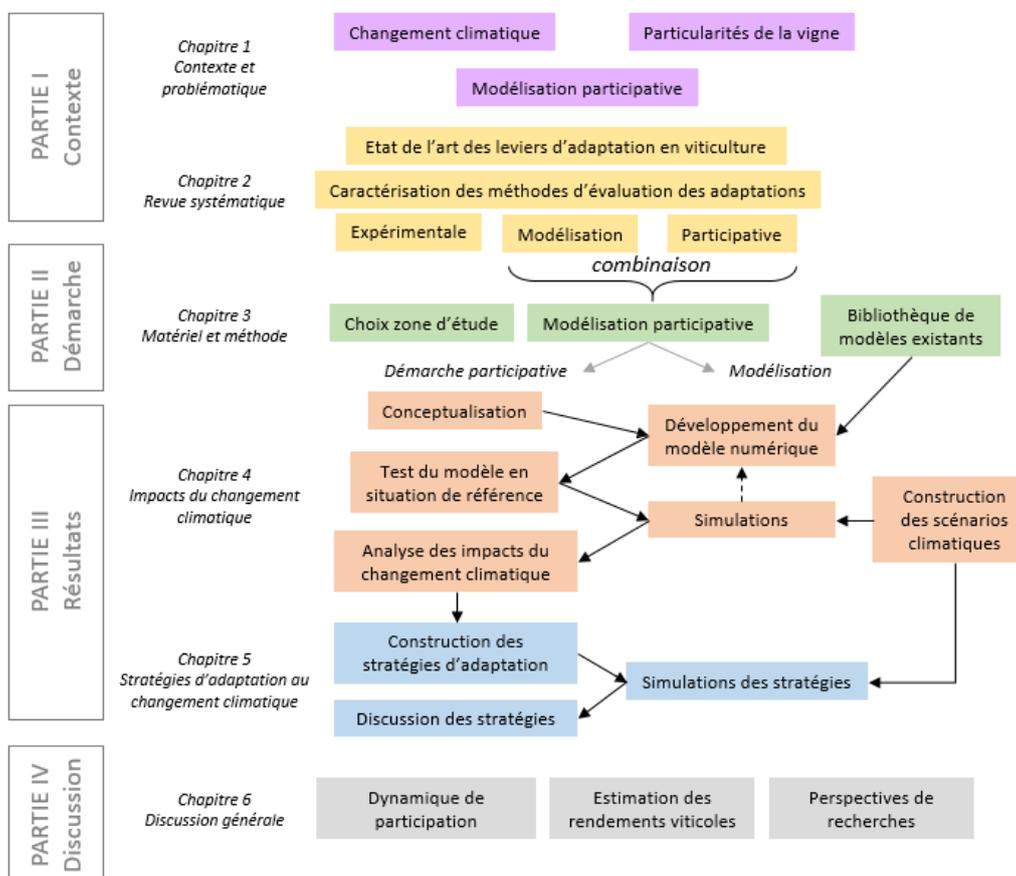


Figure 0.1. Schéma illustrant la démarche générale de ce travail de thèse.

PARTIE I

Contexte et problématique

Chapitre 1

Concevoir des stratégies d'adaptation au changement climatique au sein d'un paysage viticole

Ce premier chapitre présente le contexte scientifique dans lequel s'inscrit la problématique de cette thèse. Il illustre les principaux enjeux auxquels font face les systèmes viticoles pour s'adapter au changement climatique.

Dans une première partie, nous décrivons les multiples défis que pose le changement climatique au secteur agricole, qui doit s'appropriier des informations souvent fournies à l'échelle globale pour construire des solutions d'adaptation locales. Dans une deuxième partie, nous nous penchons sur le cas particulier de la viticulture en région méditerranéenne qui constitue notre cas d'étude. Au travers des initiatives actuelles, nous identifions les limites auxquelles sont confrontés les scientifiques et les acteurs de la filière pour déterminer les stratégies d'adaptation à mettre en œuvre pour faire face au changement climatique. Une troisième partie est consacrée à étudier le potentiel des démarches de conception basées sur la modélisation participative pour co-construire et évaluer des combinaisons de leviers d'adaptations dans le temps et dans l'espace. Enfin, nous formulons la problématique et les questions de recherche qui ont guidé ce travail de thèse.

1 Articuler changement climatique global et adaptations locales

1.1 Régionaliser les projections climatiques

Une information météorologique précise et de qualité est un facteur clé de la productivité des systèmes agricoles (Calanca et al., 2011). Elle permet aux agriculteurs d'anticiper à court terme les aléas climatiques en ajustant leurs pratiques culturales (date de semis, calendriers d'irrigation et de fertilisation, date de récolte, protection contre le gel et la grêle, etc.). Mais à l'heure où le changement climatique modifie de manière profonde et durable le climat à l'échelle planétaire, du fait de l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique dans l'atmosphère (IPCC, 2015), il convient de prévoir correctement cette évolution afin d'anticiper sur le long terme des changements plus importants au sein des systèmes agricoles (sélection variétale, développement des filières, extension de l'irrigation, etc.). S'« *il est important de comprendre la distinction entre météo et climat* »¹, les deux n'en restent pas moins liés. Depuis 1988, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) avertit sur les évolutions probables du climat (Griggs and Noguera, 2002; Solomon et al., 2007; Stocker, 2014) : augmentation des températures moyennes, changement de régime pluviométrique, baisse de la disponibilité en eau, augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes. Ces conséquences, parfois déjà visibles, représentent à la fois une menace (ex. destruction de récolte) mais également une opportunité (ex. extension des zones cultivables) pour la productivité de l'agriculture. Les projections climatiques sont des informations cruciales pour anticiper ces changements en réduisant la vulnérabilité des systèmes agricoles face au changement climatique.

Les projections climatiques reposent sur deux types de travaux complémentaires :

- la prévision des évolutions socio-économiques (économie, technologie, démographie, mode de vie, politiques publiques) qui sont décrites selon les quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, appelés Representative Concentration Pathways (RCP), et sont régulièrement mis à jour² (Figure 1.1A). Chaque RCP porte le nom du forçage radiatif associé à l'augmentation de la concentration en GES : 2.6, 4.5, 6.0

¹Tribune publiée par Samuel Morin, chercheur à Météo France, dans le journal « Le Monde » le 23/03/2021 suite à une vague de froid en France, ayant notamment eu pour conséquence le gel de plusieurs cultures horticoles et arboricoles le 8/04/2021.

²Pendant l'écriture de ce manuscrit, le GIEC a publié son dernier rapport sur le climat, définissant cinq « Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) » qui élargissent le champ d'actions des RCP en prenant en compte l'évolution d'un plus grand nombre de gaz à effet de serre et de polluants de l'air dans l'établissement des SSPs.

et 8.5 W.m^{-2} . Le scénario RCP 2.6 traduit l'ambition des engagements de la COP 21³, avec une réduction des émissions de GES dès 2020 jusqu'à leur disparition avant 2100. Le RCP 8.5 quant à lui correspond à une émission croissante de GES (Moss et al., 2010) ;

- la modélisation climatique intègre en entrée de modèles climatiques les quatre scénarios RCP. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés modèle de circulation générale (GCM pour Global Circulation Model) qui couvrent l'ensemble du globe et prennent en compte les processus biophysiques couplés entre l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la surface du sol. Ainsi, les climatologues produisent des séries temporelles d'évolution de variables climatiques comme les températures (Figure 1.1B), la pluie, le rayonnement global, l'humidité et le vent, à pas de temps journalier. Cependant, les incertitudes liées à l'utilisation de modèles sont importantes, et sont dûment évaluées par la communauté scientifique au cours des phases d'intercomparaisons de modèles couplés (CMIP ; Taylor et al. 2012). Des méthodes de régionalisation permettent de fournir des données à l'échelle régionale grâce à des modèles de circulation régionale (RCM pour Regional Circulation Model) d'une résolution d'une dizaine de km^2 (Quénol et al., 2017).

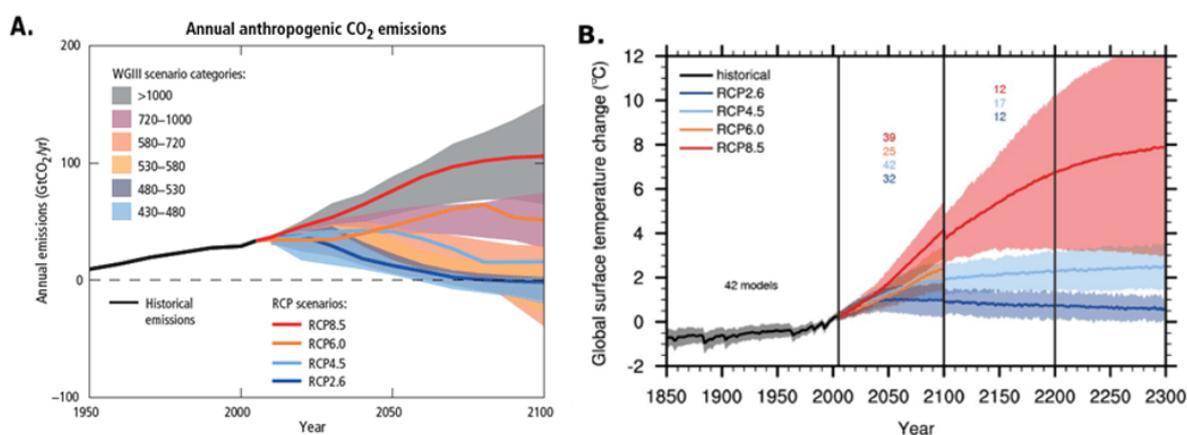


Figure 1.1 Trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre décrites pour les quatre scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) (A), et anomalie de la température annuelle moyenne par rapport à la période 1986-2005 (B). Figure adaptée du 5^{ème} rapport du GIEC (IPCC, 2015).

L'étude régionale du changement climatique montre une hétérogénéité entre régions du monde. Giorgi (2006) montre que la région méditerranéenne devrait être un des principaux *hot-spots* du changement climatique. Cette particularité méditerranéenne est reprise par

³La 21^{ème} conférence internationale sur le climat qui s'est déroulée à Paris en 2015, et a donné lieu à un nouvel accord pour contenir le réchauffement climatique en dessous des 2°C.

de nombreux auteurs (ex. Planton et al. 2012; Cramer et al. 2018; Lionello and Scarascia 2018). Zittis et al. (2019) montrent les principales évolutions des températures et de la pluviométrie annuelles prévues d'ici 2050 et 2100 pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (Figure 1.2). Les projections régionales⁴ suggèrent une augmentation des températures de l'ordre de 1 à 5°C d'ici la fin du siècle, pour le sud de la France, en comparaison à la période 1986-2005 (Figure 1.2A). Cette augmentation est particulièrement marquée pendant l'été (+7°C). Une diminution de la pluviométrie annuelle de l'ordre de 10 à 20% est également simulée, mais avec un degré d'incertitude plus élevé (Figure 1.2B). Le climat futur sera également marqué par l'augmentation de la variabilité intra-annuelle des températures menant à des pics de chaleur, et des précipitations qui exacerbent paradoxalement la fréquence et l'intensité des épisodes de fortes précipitations (Ribes et al., 2018) et les périodes de sécheresse (Hertig and Trambly, 2017).

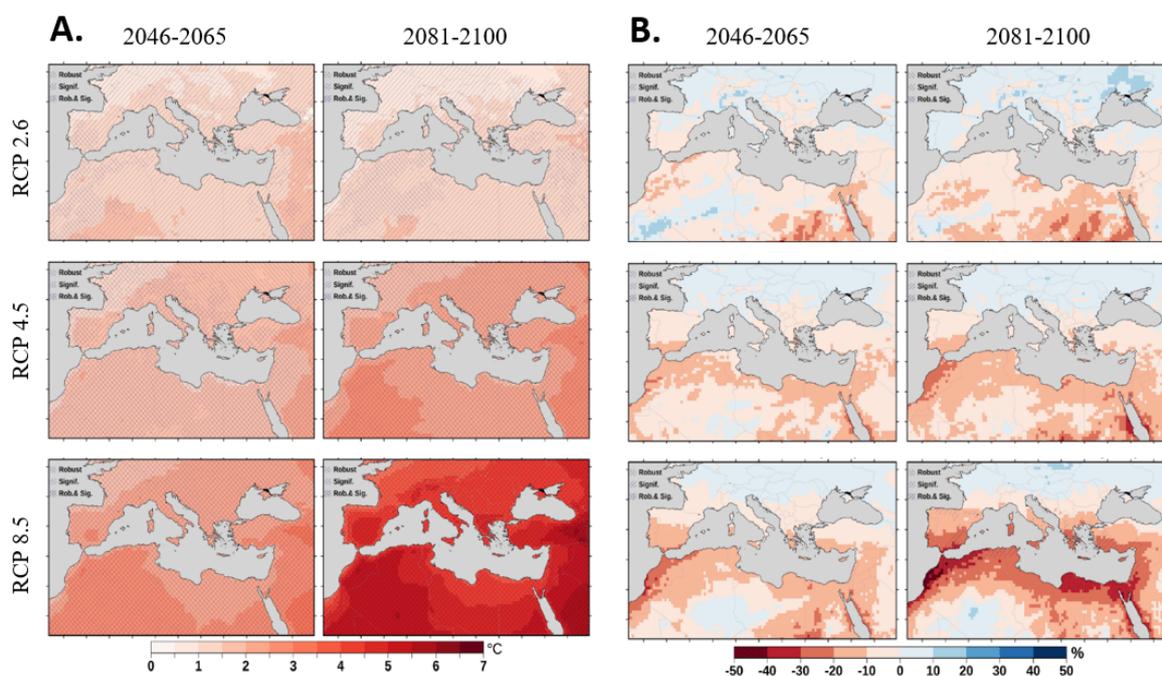


Figure 1.2 Evolutions de la température moyenne (A) et des précipitations annuelles moyennes (B) pour la région méditerranéenne comparées à la période de référence 1986-2005 (adapté de Zittis et al. 2019).

Depuis les années 2000, les travaux de recherche en (agro-)climatologie développent des méthodes de *downscaling* de plus en plus précises afin de produire des projections climatiques à une résolution spatiale de plus en plus fine (ex. Le Roux et al. 2018).

⁴Projections issues du programme MedCordex (<http://www.medcordex.eu/>), qui vise à réduire l'échelle des projections climatiques établies à l'échelle du globe à une échelle régionale, à partir d'un ensemble de modèles de circulation globale et régionale.

Le climatologue Le Treut (2010) souligne l'enjeu essentiel d'une « *meilleure prévision des évolutions climatiques locales mais aussi notre difficulté à traduire de manière locale les évolutions climatiques que nous savons surtout caractériser à une échelle globale* ». Au-delà de la production de données de plus en plus nombreuses et détaillées, cette réduction d'échelle doit s'accompagner d'une démocratisation de l'information climatique (Jancovici, 2006). Ainsi, des plateformes voient le jour pour communiquer et rendre accessibles les données issues des modèles régionaux, à l'instar de la plateforme Drias⁵. Cependant certains auteurs s'interrogent sur la nécessité d'améliorer sans cesse la précision et la diffusion des projections climatiques (ex. Dessai et al. 2009). Ils se réfèrent aux importantes incertitudes, parfois peu réductibles, qui entourent les prévisions climatiques, et proposent de communiquer plutôt une gamme de futurs climats plausibles, dont les décideurs puissent se saisir facilement pour évaluer à leur tour les impacts au sein de leur territoire, en tenant compte de leurs vulnérabilités locales et d'autres facteurs de changement (technologique, commercial, etc.).

1.2 Prévoir les impacts du changement climatique

L'agriculture est un des premiers secteurs touché par le changement climatique de par le lien étroit qu'elle entretient avec les conditions climatiques. Cependant, les impacts du changement climatique sur l'agriculture sont difficiles à cerner, tant ils concernent de manière simultanée ou successive, par action ou rétroaction, un large nombre de processus (photosynthèse, évapotranspiration, infiltration de l'eau dans les sols, biologie des sols, érosion, etc.). Il en résulte une liste d'effets, parfois compensateurs, parfois amplificateurs, que la communauté scientifique s'attelle à démêler. A titre d'exemple, l'accélération des cycles phénologiques liée à l'augmentation des températures réduit la période de croissance des plantes et donc le rendement final (Fatima et al., 2020). Or, ce même décalage phénologique peut aussi permettre d'éviter des températures élevées à certaines périodes-clés de l'élaboration du rendement comme la floraison (Rezaei et al., 2015). De même, les effets négatifs sur la production végétale liés à un stress hydrique plus important pourraient être compensés par l'effet positif du CO₂ qui tend à accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la plante (Ludwig and Asseng, 2006). A une échelle supérieure, le changement climatique rendra de nouvelles zones cultivables, au détriment de certains écosystèmes naturels (Hannah et al., 2013). En résumé, l'impact du changement climatique est la résultante d'un grand nombre d'interactions complexes dont l'intensité et le sens dépendront à la fois des conditions météorologiques futures (selon les

⁵Portail de données, soutenu par le ministère de la transition écologique français, qui a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées à l'échelle de la France (<http://www.drias-climat.fr/>)

scénarios climatiques) mais aussi de la vulnérabilité de l'activité agricole dans le contexte pédoclimatique où elle s'exerce (Réseau Action Climat, 2014).

Mesurer et prévoir les impacts du changement climatique requiert de réfléchir sur un pas de temps long. Il est d'usage d'utiliser des séries climatiques de 20 à 30 ans. Au sein de ce temps long, des indicateurs sont mesurés ou calculés. Il existe différents types d'indicateurs selon les systèmes étudiés (ex. production agricole, débit des cours d'eau, pression parasitaire), les critères d'intérêt (techniques, économiques, environnementaux, sociaux), leurs échelles et agrégations spatiales et temporelles (ex. moyenne, variabilité, fréquence ; Allain et al. 2018a) et leur mode de calcul (ex. quantitatif ou qualitatif, basé sur des observations, de la modélisation, du participatif ; Bockstaller et al. 2008). Dans le cas du changement climatique, le choix de la valeur de référence de l'indicateur à laquelle on compare son évolution future est important (Carter, 1996). Cette référence peut être une valeur historique passée, une valeur future sans adaptation au changement climatique (*business as usual*), une valeur future qui prend en compte une adaptation autonome en réponse au changement climatique. En résumé, il existe une multitude d'indicateurs possibles pour l'étude de l'impact du changement climatique, mais les choix réalisés pour leur construction doivent être explicites et transparents pour être correctement communiqués (Bockstaller et al., 2008).

Il existe quatre types de méthodes pour évaluer l'impact du changement climatique (Carter, 1996) : par expérimentation, par analogie, par modélisation, par jugement expert. Chacune de ces méthodes est illustrée au travers d'exemples tirés de la filière viticole (Figure 1.3).

L'expérimentation permet de mesurer directement la réponse des plantes à des conditions climatiques contrôlées (enrichissement en CO₂, températures élevées, stress hydrique). Les résultats s'établissent à des échelles de temps et d'espace restreintes et pour des combinaisons réduites (stress climatique x sol x cépage x itinéraire technique).

La méthode par analogie utilise des observations passées ou présentes à travers plusieurs régions du globe pour anticiper les impacts futurs. Par exemple, l'avancée de la date de vendanges est reconnue par l'ONERC⁶ comme un marqueur du réchauffement climatique (Figure 1.3B). Cependant, la projection de la tendance observée vers le futur est limitée du fait que la date de vendanges varie selon des facteurs de changements non-climatiques (ex. encépagement, degré d'alcool à la vendange).

La modélisation numérique permet de quantifier les effets d'un large panel de changements (climatiques, techniques, institutionnels, etc.) au sein de systèmes complexes et en interactions, et à des échelles de temps long. A l'instar des projections climatiques qu'ils

⁶Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique.

utilisent, les modèles prévoient des impacts empreint d'incertitudes et nécessairement incomplets du fait de la représentation simplifiée de la réalité qu'ils impliquent.

Le jugement expert se base sur la perception des effets du changement climatique par des experts⁷, souvent dans le but d'aider à la prise de décision. Cette méthode a l'avantage de prendre en compte les particularités locales et plusieurs facteurs de changement, mais produit souvent des résultats qualitatifs, desquels il est parfois difficile de connaître la résultante d'effets compensateurs.

Ces quatre méthodes sont complémentaires et doivent être choisies en fonction de l'objectif de l'étude (compréhension, prévision, exploration, décision), de son échelle (du km² au monde), de sa localisation (en lien avec les problématiques locales) et des données disponibles.

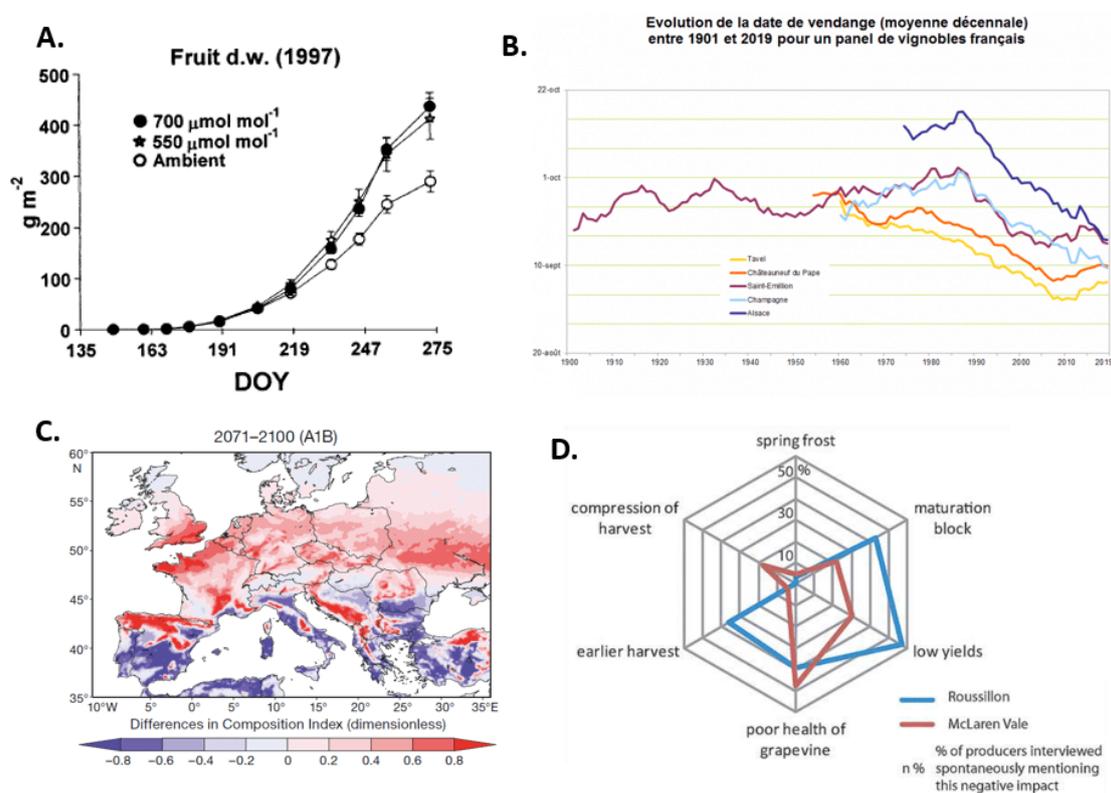


Figure 1.3 Quatre exemples d'impacts du changement climatique en viticulture, en fonction de quatre différentes méthodes d'évaluation : (A) par expérimentation : effets de l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère sur la croissance des fruits (d.w = poids sec) (Bindi et al., 2001) (B) par analogie : évolution de la date de vendanges (source : ONERC), (C) par modélisation : évolution des zones cultivables en vigne (Malheiro et al., 2010), (D) par jugement expert : impacts négatifs du changement climatique sur la maturation des baies (Lereboullet et al., 2013a)

⁷Individu avec une connaissance technique ou empirique du système étudié (Leenhardt et al., 2012)

1.3 S'adapter localement

L'adaptation est définie par le deuxième groupe de travail du GIEC comme « l'ensemble des évolutions d'organisation, de localisation et de techniques que les sociétés devront opérer pour limiter les impacts négatifs du changement climatique et en maximiser les effets bénéfiques » (Field and Barros, 2014). Prévoir le bénéfice que pourra apporter telle évolution comparée à une autre soulève plusieurs défis. D'abord, il faut définir selon quels critères une adaptation peut être considérée comme réussie. Adger et al. (2005) définissent une adaptation comme réussie, si elle est efficace, efficiente, équitable et légitime, ce qui met bien en évidence le nécessaire caractère multicritère de l'évaluation de l'adaptation. Ensuite, il faut définir par rapport à quels systèmes et à quels horizons temporels l'adaptation est bénéfique. Lobell (2014) illustre, au travers de l'exemple du rendement d'une culture agricole, comment une avancée technologique peut s'avérer être une adaptation ou non, en fonction de sa capacité à réduire l'impact du changement climatique sur le système (Figure 1.4). Une évaluation rigoureuse des adaptations est nécessaire pour servir de support pour la mise en place de politiques et de pratiques d'adaptation (Nalau and Verrall, 2021), et ce particulièrement pour d'éviter la maladaptation (Figure 1.4C), i.e. une situation où la vulnérabilité aux aléas climatiques se trouverait paradoxalement accrue suite à des mesures d'adaptation (Barnett and O'Neill, 2010).

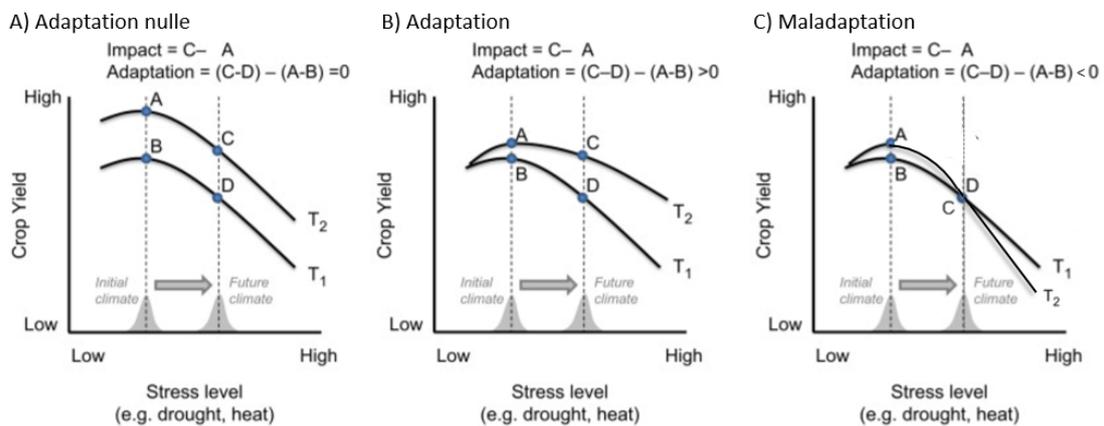


Figure 1.4 Illustration de la manière dont l'effet de l'adaptation au changement climatique doit être calculé pour les nouvelles technologies agricoles (panels A et B tirés de Lobell (2014), panel C (adapté par l'auteur)). T1 : système sans nouvelle technologie, T2 : système avec une nouvelle technologie. A) la technologie permet d'améliorer la performance du système de façon égale sous climat initial et futur, B) la technologie a peu d'effet sous climat initial mais s'avère plus performante sous climat futur, C) la technologie apporte un avantage Yield sous climat initial mais qui s'avère délétère sous climat futur.

Il existe différentes voies d'adaptation de l'agriculture, qui sont non exclusives entre elles (Tableau 1.1). Les leviers d'adaptation sont les mesures et actions, individuelles ou collectives, qui peuvent être mises en place pour limiter les pertes liées au changement climatique (ex. irrigation, ombrage), les supporter (ex. assurance), limiter l'exposition au risque climatique (ex. décalage cultural), ou exploiter de nouvelles opportunités (ex. nouvelles productions)⁸. L'articulation de ces leviers, dans le temps, dans l'espace, et à travers les échelles (parcelle, exploitation, territoire) doit tendre vers l'augmentation durable de la productivité et des revenus, l'adaptation au changement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre⁹.

Tableau 1.1 Voies et leviers d'adaptation de l'agriculture au changement climatique.

Voies d'adaptation	Leviers d'adaptation	Sources
Modifier les calendriers culturaux	Date de semis et de récolte Sélection variétale	(Brisson and Levrault, 2010)
Améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau	Sélection variétale Choix des modes de conduite (pour les pérennes : densité, charge en fruits, etc.) Date de semis Irrigation de précision Réduction de la demande évaporative (ombrage, anti-transpirants, etc.)	(PNACC, 2011; Brisson and Levrault, 2010; CGEDD and CGAAER, 2020)
Améliorer le stockage de l'eau dans les sols	Travail du sol ou non-labour Fertilisation organique Couverture du sol (plante de couverture, résidus de culture, mulch, etc.) Infrastructures écologiques (arbres, haies, bandes enherbées)	(ADEME and ICARE and Consult, 2016; CGEDD and CGAAER, 2020)
Développer des systèmes de surveillance et d'alerte aux nouveaux risques sanitaires et climatiques	Dispositifs de surveillance Dispositifs de protection (gel, grêle, vague de chaleur) Expertise	(PNACC, 2011; Coordination SUD, 2015)
Gérer les risques inhérents à la variabilité du climat	Systèmes assurantiels Fonds de mutualisation	(PNACC, 2011)
Promouvoir l'aménagement du territoire au regard des vulnérabilités et opportunités locales	Choix des productions Diversification Stockage d'eau Agri-voltaïsme	(PNACC, 2011; CGEDD and CGAAER, 2020)

Au sein d'un territoire, il existe des opportunités et des contraintes qui déterminent pourquoi, comment et quand mobiliser ces leviers, et qui les mobilisent. Haasnoot et al.

⁸Typologie de leviers d'adaptations issue de la plateforme européenne d'échanges sur le changement climatique ClimateADAPT (<https://climate-adapt.eea.europa.eu/>)

⁹Définition de l'agriculture climato-intelligente selon FAO (2013)

(2020) conceptualisent ces interactions au sein de l'espace des solutions. La conception de stratégies d'adaptation au changement climatique, acceptables localement, explore une partie de cet espace pour y trouver des synergies et des antagonismes. Ces synergies et antagonismes se situent à l'interface entre plusieurs échelles imbriquées (Figure 1.5). Par exemple, l'installation de l'irrigation à l'échelle de la parcelle est dépendante du développement d'un réseau ou 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 paysage (Chopin et al., 2017), défini comme le lieu où interagissent les processus biophysiques, les pratiques culturelles et les acteurs¹⁰ (Benoît et al., 2012). Les systèmes de culture s'y répartissent en fonction de variables physiques (ex. types de sol, topographie, hydrographie), techniques (ex. réseau d'irrigation) et institutionnelles (ex. zone d'appellation). Les stratégies d'adaptation au changement climatique doivent alors combiner plusieurs leviers à ces différentes échelles afin de favoriser les synergies et de lever les contraintes (Figure 1.5). Frédéric Levrault¹¹ souligne l'importance de rechercher une « double proximité » (Réseau Action Climat, 2014) : une proximité spatiale en intégrant l'adaptation au changement climatique dans la réalité locale de l'activité agricole, et une proximité temporelle en étudiant et proposant des leviers d'adaptation et des transitions (techniques, économiques, organisationnelles) à des horizons de temps relevant de la décision agricole.

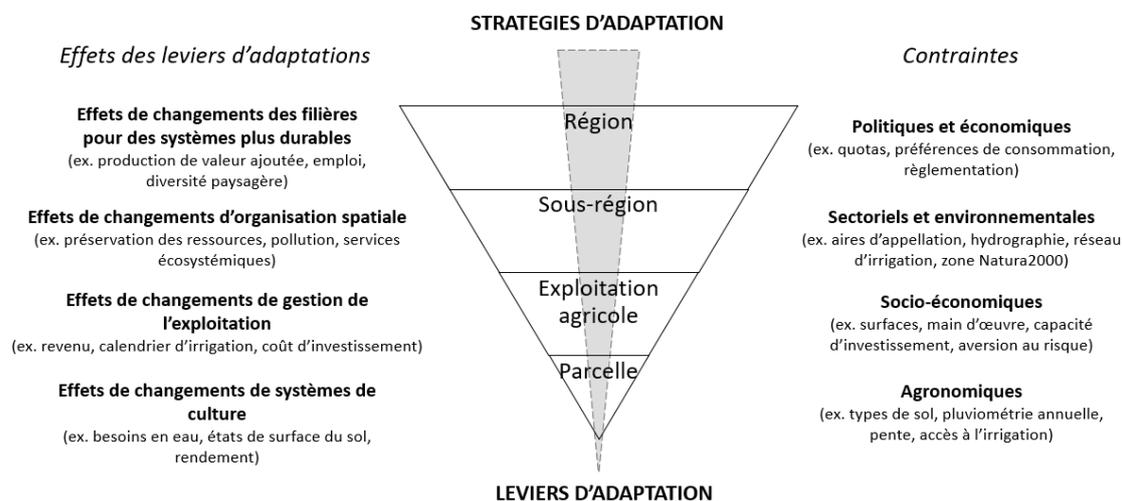


Figure 1.5 Interrelations entre échelles spatiales pour l'adaptation au changement climatique (adapté de Chopin et al. 2017). Le paysage, selon son étendue, concerne les échelles régionales et sous-régionales.

¹⁰Individu qui participe activement, qui agit sur un processus (définition Larousse)

¹¹Expert changement climatique pour les chambres d'agriculture.

2 La viticulture face au changement climatique

2.1 La vigne, un cas d'étude historique

La viticulture est un cas d'étude exemplaire pour le changement climatique (Mosedale et al., 2016) pour trois grandes raisons : son rôle de marqueur des changements climatiques anciens et contemporains, son caractère pérenne qui encourage à se préparer dès maintenant aux conditions futures, et la diversité des terroirs¹² qu'elle présente, qui constituent autant d'opportunités pour l'adaptation.

La vigne est une culture sensible aux variations climatiques (Jones and Webb, 2010). De façon globale, la caractérisation climatique d'une région viticole détermine en grande partie son potentiel viticole et œnologique (Tonietto and Carbonneau, 2004), alors que les variations saisonnières sont des facteurs clés de la production, en quantité et qualité (Jones, 2015). De plus, la vigne est particulièrement tolérante à la sécheresse (Gambetta et al., 2020) et majoritairement non irriguée en France. Elle entretient un rapport ambivalent avec le déficit hydrique, dont les périodes et les intensités déterminent la quantité et la composition des raisins, puis du vin (Smart and Coombe, 1983). Enfin, le cycle de la vigne au printemps-été l'expose à des épisodes de gel, de grêle, et de températures extrêmes, qui peuvent mener à la perte totale de la récolte (Webb, 2009).

Le caractère pérenne de la vigne implique de réfléchir à la fois sur le temps long de sa durée de vie (en moyenne 30 ans, mais pouvant aller jusqu'à plus de 60 ans), sur le temps « rond » de son cycle annuel et le temps court des ajustements tactiques (Figure 1.6). Par exemple, un certain nombre de choix à la plantation (ex. localisation, matériel végétal, densité de plantation) déterminent l'évolution de variables agronomiques saisonnières (ex. eau dans le sol, température du couvert). De plus, la succession pluriannuelle de stress (hydrique, thermique) et d'aléas (gel, grêle) peut avoir des impacts plusieurs années successives, notamment du fait que l'élaboration du rendement de la vigne s'établit sur deux ans (Guilpart et al., 2014).

Enfin, la diversité spatiale de la vigne lui confère un éventail d'adaptations des plus nombreux (Neethling et al., 2019). A travers sa répartition géographique et son histoire, la viticulture s'est diversifiée (cépages et clones, système de conduite, pratiques culturales, valorisation économique) pour s'adapter à des conditions pédoclimatiques parfois sous-optimales (Mosedale et al., 2016). Cette capacité du secteur viticole à innover laisse entrevoir des marges de manœuvre pour l'adaptation.

¹²« Un terroir est un espace géographique délimité défini à partir d'une communauté humaine qui construit [...] un ensemble de traits culturels distinctifs, de savoirs et de pratiques, fondés sur un système d'interactions entre le milieu naturel et les facteurs humains » (charte Terroirs and Cultures, 2005)

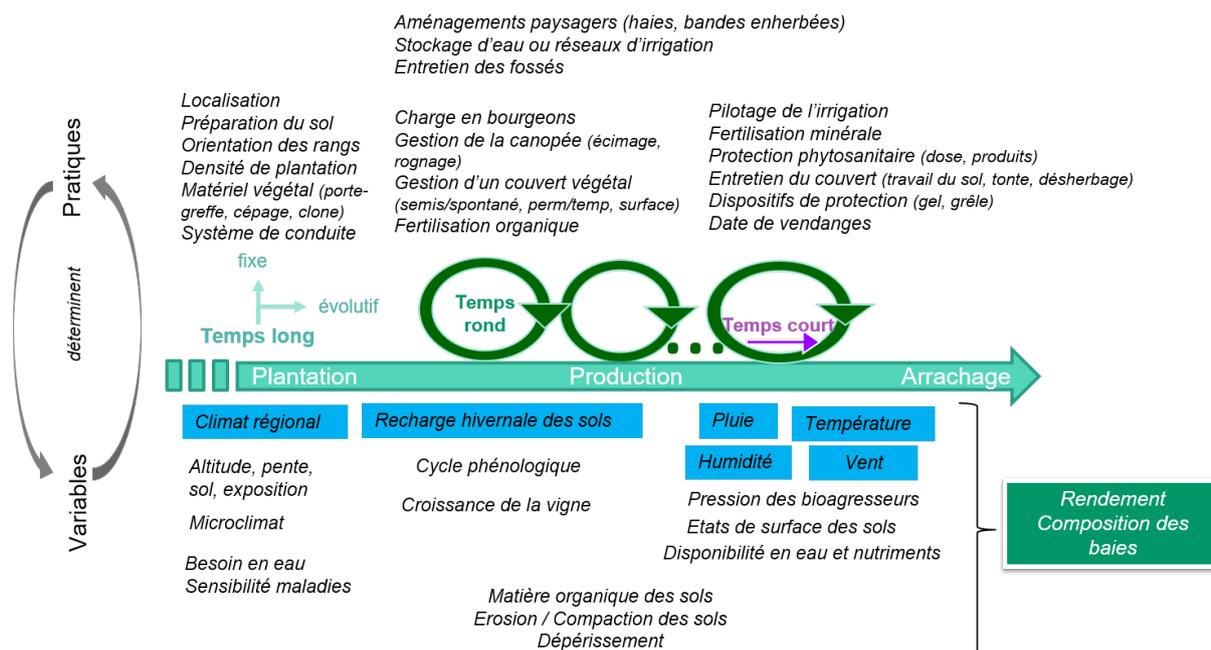


Figure 1.6 Échelles de temps d'une plante pérenne (ex. la vigne), en relation avec les pratiques et les variables biophysiques et agronomiques associées : le temps long de la durée de vie de la plante, le temps « rond » de son cycle annuel et le temps court des ajustements tactiques. En bleu, les variables directement liées au changement climatique (source : A. Metay + auteur).

2.2 Les impacts du changement climatique en viticulture

L'état de la recherche sur les impacts du changement climatique en viticulture est déjà très avancé, et a fait l'objet de nombreuses revues (Christ and Burritt, 2013; Fraga et al., 2012b; Jones and Webb, 2010; Mosedale et al., 2016; Ollat et al., 2016; Santos et al., 2020). Les principales tendances observées ou prédites diffèrent selon les régions viticoles. D'une part, les vignobles septentrionaux pourront être avantagés par des températures et une concentration en CO₂ plus élevées (Garcia de Cortazar Aauri, 2006; Jones et al., 2005). D'autre part, les vignobles déjà soumis à des contraintes hydriques estivales (ex. vignoble méditerranéen) pourraient voir leur rendement baisser et la composition des baies et des vins être modifiée (alcool potentiel, acidité, arômes, couleur) (van Leeuwen and Destrac-Irvine, 2017). L'avancée et l'accélération du cycle phénologique sont constatées dans tous les vignobles (Alikadic et al., 2019; Caffarra and Eccel, 2011; Garcia De Cortazar Aauri et al., 2017). Les impacts concernant l'incidence des bioagresseurs sont quant à eux bien plus difficile à évaluer (Bois et al., 2017). Parmi l'ensemble des impacts cités précédemment, ceux concernant la disponibilité en eau sont les plus préoccupants car son excès ou son absence sont souvent les facteurs limitants la production viticole (Gambetta et al., 2020).

Ces impacts sont principalement décrits selon des résultats d'expérimentation, des indices agro-climatiques et de la modélisation. Des expérimentations permettent de reproduire des conditions climatiques futures : atmosphère enrichie en CO₂ (Bindi et al., 2001; Moutinho-Pereira et al., 2009; Wohlfahrt et al., 2018), températures élevées (e.g. Moutinho-Pereira et al. 2010; Sadras and Soar 2009), stress hydrique (e.g. Bindi et al. 2005; Trigo-Córdoba et al. 2015; Vaz et al. 2016), mais rares sont les combinaisons de ces facteurs climatiques (Bonada et al., 2018; Salazar-Parra et al., 2015). Ces expérimentations permettent de suivre des paramètres physiologiques de la vigne (ex. conductance stomatique, potentiel hydrique, biomasse) mais n'excèdent jamais six années consécutives, ce qui pose le problème de l'étude à long terme de l'acclimatation de la vigne aux conditions climatiques futures (Salazar-Parra et al., 2015).

En viticulture, il existe un grand nombre d'indices climatiques (quelques exemples sont donnés dans le Tableau 1.2) qui sont calculés en fonction des températures (minimale, maximale et moyenne), de la pluviométrie, ou d'une combinaison des deux (Malheiro et al., 2010). Ces indices sont généralement calculés d'avril à septembre, sans prendre en compte les décalages phénologiques prévus par le changement climatique. D'autres indices se basent sur l'étude de corrélation entre la distribution actuelle des systèmes viticoles et des variables climatiques (Hannah et al., 2013; Moriondo et al., 2013). Le développement d'indicateurs éco-climatiques, qui prennent en compte davantage de paramètres écophysiologiques et de pratiques culturales, sont prometteurs pour la cartographie des zones cultivables en vigne dans le futur (Caubel et al., 2015).

Tableau 1.2 Exemples d'indicateurs agroclimatiques viticoles (Tn, Tx, Tm réfèrent aux températures minimales, maximales et moyennes journalières, k un paramètre d'ajustement fonction de la latitude, W₀ réserve utile (200 mm par défaut), P : Précipitation, Tv : transpiration et Es : évaporation)

Indice	Equation	Source
Indice de Huglin	$\sum_{01/04}^{30/09} \max\left(\frac{(T_m-10)+(T_x-10)}{2}, 0\right)$	(Huglin and Schneider, 1998)
Indice de Winkler	$\sum_{01/04}^{31/10} \max\left(\frac{T_x+T_n}{2} - 10, 0\right)k$	(Winkler et al., 1974)
Indice de nuits fraîches	$\sum_{01/09}^{30/09} \frac{T_n}{(n=30)}$	(Tonietto and Carbonneau, 2004)
Indice de sécheresse	$\sum_{Apr}^{Sept} (W_0 + P - Tv - Es)$	(Tonietto and Carbonneau, 2004)

Enfin, la modélisation de la vigne dans le contexte de changement climatique a fait l'objet d'une revue des modèles existants par Moriondo et al. (2015). Les auteurs écartent

les modèles empiriques pour l'étude d'impact du changement climatique et soulignent l'existence de plusieurs modèles mécanistes mobilisables : STICS (Garcia de Cortazar Atauri, 2006), UNIFI.GrapeML (Leolini et al., 2018), WaLIS (Celette et al., 2010), etc. Il faut tout de même souligner que la modélisation des plantes pérennes soulève encore de nombreux enjeux, notamment du fait de l'adaptation de modèles au départ conçus pour des plantes annuelles.

2.3 Les acteurs impliqués dans la recherche d'adaptations

La recherche d'adaptation pour la viticulture mobilise un grand nombre d'acteurs de la filière, dont les travaux se situent à différentes échelles. A l'échelle nationale, le projet LACCAGE (2012-2015 ; Ollat and Touzard 2014), puis son deuxième volet - dont cette thèse fait partie (2018-2021 ; Annexe A) - vise à échanger, capitaliser et coordonner les activités de recherches issues de plusieurs disciplines (écophysiologie, agronomie, œnologie, sociologie, etc.) sur l'adaptation du secteur viticole au changement climatique en France. Dans ce cadre, une analyse prospective a mobilisé plus d'une centaine d'acteurs pour proposer quatre scénarios d'évolution socio-économique de la filière : conservateur, nomade, libéral, et le scénario innovant qui a été le plus plébiscité (Aigrain et al., 2016). Des dispositifs expérimentaux (de type collections de cépage) ont également vocation à identifier les cépages adaptés aux futures conditions climatiques (ex. dispositif VitAdapt¹³ ; Destrac-Irvine and van Leeuwen 2016). Aux échelles régionales, les instituts techniques et chambres d'agriculture appuient le développement d'expérimentations pour évaluer certaines adaptations comme les filets d'ombrage ou l'écimage sévère (Payan, 2017). Leurs études technico-économiques alimentent également la mise en place de projets de politiques publiques, comme par exemple le schéma départemental de développement de l'irrigation dans l'Hérault (Département Hérault, 2019). A l'échelle locale, des initiatives comme les « climathons » permettent de créer un espace d'échanges entre acteurs pour trouver des solutions locales (Nougier et al., 2020). Les syndicats d'AOP s'organisent également pour introduire, à titre expérimental, de nouveaux cépages (étrangers ou patrimoniaux) dans leur cahier des charges (Boursiquot, 2018).

Les leviers d'adaptation proposés dans le cadre du projet LACCAGE ont été classés en six catégories (Figure 1.7). Ils font l'objet d'une revue détaillée dans le Chapitre 2. La mobilisation de ces leviers dépend de caractéristiques biophysiques, techniques, organisationnelles et institutionnelles, qui ont été étudiées dans différents vignobles : Roussillon (Delay et al., 2015; Lereboullet et al., 2013a), Anjou-Saumur (Neethling et al., 2017), en Espagne (Resco et al., 2016), en Australie (Bardsley et al., 2018; Lereboullet et al., 2013b)

¹³Parcelle implantée en 2009, près de Bordeaux, composée de 52 cépages différents

et en Californie (Nicholas and Durham, 2012). Le point commun de ces études est qu'elles mobilisent les viticulteurs pour exprimer leurs solutions d'adaptations, dans leur contexte de production.



Figure 1.7 Extrait de l'infographie « La vigne, le vin, et le changement climatique en France » issue du projet LACCAVE

2.4 Les limites des études actuelles

Malgré les multiples leviers d'adaptation proposés, les scientifiques et les professionnels du secteur viticole peinent à trouver un consensus clair sur les stratégies d'adaptation à mettre en place (Mosedale et al., 2016). D'une part, les études actuelles sur l'impact et l'adaptation au changement climatique rencontrent des difficultés à « capturer » la diversité des systèmes viticoles. De nombreuses questions se posent encore : quels leviers pour quels systèmes de culture (AOP/IGP, irrigué/non irrigué, conventionnel/biologique, etc.) ? Peut-on les combiner, et comment ? Quelles surfaces viticoles sont concernées par ces leviers ? Pour répondre à ces questions, des auteurs prônent de construire des stratégies « à haute résolution » (Neethling, 2016; Moriondo et al., 2021). Selon moi, il s'agit surtout d'adopter une approche spatialisée, non seulement du climat comme cela est déjà en cours (ex. Bonnefoy 2013; Le Roux et al. 2017), mais également des agroécosystèmes afin de mieux prendre en compte la faisabilité et les performances des leviers d'adaptation en fonction de la variabilité spatio-temporelle des facteurs du milieu, des exploitations agricoles et des techniques (Boiffin et al., 2014).

D'autre part, les informations fournies par ces études se sont pas toujours adaptées aux attentes des acteurs de la filière viticole. En effet, la modélisation fournit une information quantitative intéressante pour répondre à des questions telles que : quels

sont les compromis à faire pour assurer la pérennité du vignoble ? Pour quelle intensité de changement climatique les leviers sont-ils pertinents ? Mais la complexité des modèles utilisés rend la communication et l'appropriation de leurs résultats difficiles. Les approches participatives permettent, quant à elles, de produire une information pertinente localement et directement construite, et partagée, avec les acteurs. Cependant, la nature de cette information, souvent qualitative, rend difficile la projection des impacts sous conditions climatiques futures. La co-production d'informations sur le changement climatique alliant ces deux types d'approches est, selon Mosedale et al. (2016), une solution pour garantir la pertinence des informations fournies.

3 Combiner modélisation et approches participatives pour construire et évaluer des stratégies d'adaptation à l'échelle des paysages

3.1 La modélisation participative, une démarche au service de la conception

L'adaptation au changement climatique pose la question de « *l'agir dans l'incertain* » avec une acuité particulière (Wilby and Dessai, 2010). Une approche de modélisation est nécessaire pour explorer les futurs possibles au travers d'une simplification de la réalité, mais cette modélisation doit inclure les parties prenantes. Une telle approche de modélisation avec les acteurs est reconnue pour sa capacité à (1) améliorer la connaissance des parties prenantes sur le fonctionnement d'un système et de sa dynamique et (2) identifier et analyser les impacts de solutions potentielles (Voinov and Bousquet, 2010). En ce sens, la modélisation participative est une démarche ancrée dans un processus de conception, qui permet d'imaginer des objets nouveaux (systèmes, outils, scénarios, organisations, etc.), en même temps que de réfléchir à leurs performances, opportunités et freins.

L'implication des acteurs, aussi appelée conception à dire d'experts¹⁴, est particulièrement adaptée pour aborder la complexité des problèmes environnementaux (Reed, 2008), comme le changement climatique. Elle permet entre autres de construire des solutions plus réalistes et adaptées localement (Sautier et al., 2017). Les objets finaux co-conçus sont de natures variées. Il peut s'agir de systèmes de culture (ex. Périnelle et al. 2021), d'organisations spatiales de systèmes de culture (ex. Murgue et al. 2016), ou de scénarios

¹⁴Selon la classification des méthodes de conception de Loyce and Wery (2006) : diagnostic agronomique, conception à dire d'expert et approches *in silico*

qualitatifs (ex. Baccar et al. 2021) ou quantitatifs (ex. Hossard et al. 2013). Outre les produits finaux, les interactions avec les acteurs font naître des objets intermédiaires qui peuvent être des plateaux de jeu (D'Aquino, 2016), des représentations partagées (Etienne et al., 2008), ou des modèles (Van den Belt, 2004), qui constituent eux-mêmes des résultats.

Les approches *in silico*, i.e. par modélisation, permettent d'évaluer *ex ante* une large gamme d'alternatives (Bergez et al., 2010). L'expérimentation virtuelle permet de tester des solutions qui auraient été impossibles à mener dans le monde réel du fait des larges échelles temporelles, spatiales, et des spécificités locales des enjeux du changement climatique. La participation des acteurs au processus de modélisation permet à ces derniers d'apprécier le potentiel et les limites du modèle et de sa structure sous-jacente, favorisant ainsi la communication de ses résultats (Van den Belt, 2004). Cependant, l'utilisation des modèles avec les acteurs pose la question de leur complexité. La modélisation participative encourage le choix ou le développement de modèles simples, transparents et guidés par les acteurs (Voinov and Bousquet, 2010).

3.2 Des démarches aux objectifs multiples

Il existe autant de démarches de modélisation participative que d'objectifs, à la fois en terme de modélisation et en terme de participation (Figure 1.8).

Nous pouvons attendre d'une approche participative le simple recueil de réactions des participants en essayant de maximiser la diversité des points de vue (ex. van Berkel and Verburg 2014). Une implication plus importante des acteurs peut permettre une prise de conscience et une exploration des enjeux, notamment via des phases de simulations (ex. Modélisation d'Accompagnement ; Etienne 2014). La participation peut être un résultat *per se* afin d'atteindre un consensus pouvant se traduire en plan d'actions (ex. Shared Vision Planning¹⁵).

Les objectifs d'un processus de modélisation sont aussi graduels en fonction du choix et de la place du modèle. Dans certaines études, le modèle préexiste à la démarche participative (ex. Marjou and Garcia De Cortazar Atauri 2019; Catarino et al. 2021). La participation est alors un moyen pour renseigner les entrées du modèle et discuter ses résultats. Parfois le modèle n'existe pas complètement mais le savoir expert peut orienter les choix de modélisation parmi un panel de formalismes déjà existants (Lamanda et al., 2012). Enfin, le modèle lui-même, qu'il soit qualitatif (modèle conceptuel) ou quantitatif (modèle de simulation) peut être un objectif de l'étude comme dans les démarche de

¹⁵<https://www.iwr.usace.army.mil/Missions/Collaboration-and-Conflict-Resolution/Shared-Vision-Planning/>

Mediated modelling (Van den Belt, 2004) ou de Group Model Building (Andersen et al., 1997). Dans ces deux derniers cas, en plus de servir de support de réflexion, le modèle fournit alors aux scientifiques des informations-clés sur les systèmes d'étude qui ne sont pas forcément décrits dans des modèles existants (Andersen et al., 1997).

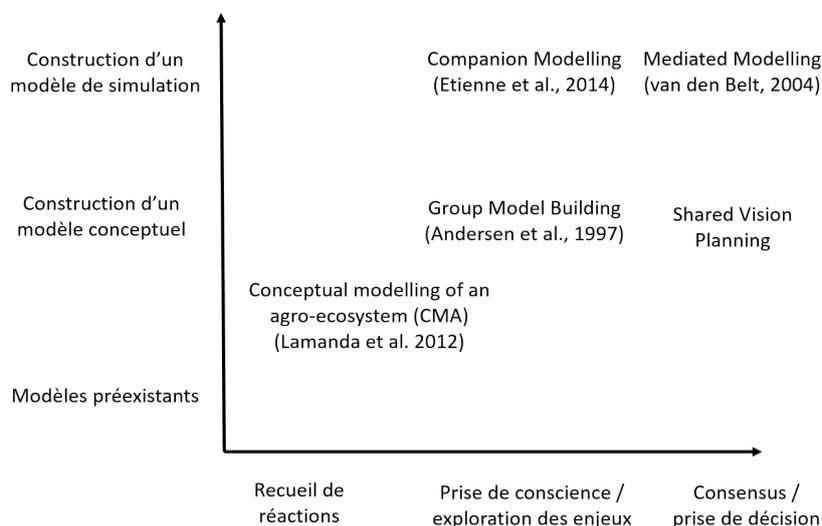


Figure 1.8 Classification des démarches de modélisation participative en fonction de leur objectifs, vis-à-vis des modèles (en ordonnée) et de la participation (en abscisse) (source :auteur)

La définition des objectifs et de la méthode varie en fonction du contexte, des ressources disponibles et du niveau d'engagement des participants dans le processus. Il est important de formaliser clairement le rôle de la participation des acteurs, et de les inclure le plus tôt possible dans le processus (Van den Belt, 2004). Il existe plusieurs types d'interactions entre chercheurs-modélisateurs et acteurs, qui correspondent également à différentes postures de recherche et de *leadership* (Hämäläinen et al., 2020). Le Gal et al. (2011) distinguent clairement des approches orientées « conception » de celles orientées « accompagnement à la conception ». Quels que soient l'orientation et le niveau d'interactions choisis, le plus grand enjeu de la modélisation participative reste d'articuler une information qualitative avec des modèles quantitatifs. Leenhardt et al. (2012) proposent un cadre méthodologique qui met en exergue l'importance à accorder aux phases de « traduction » de l'information à chaque étape du processus : définition du problème, construction des scénarios, représentation et appropriation des résultats.

La modélisation participative représente une opportunité pour les études sur l'adaptation du changement climatique. Elle permet d'abord de revoir les approches de modélisation, en mettant en lumière le principe de parcimonie nécessaire à la construction et la communication de modèles (Passioura, 1996). Elle permet ensuite de pallier certaines

limites de la modélisation comme par exemple la prise en compte des événements extrêmes ou de l'effet des bioagresseurs (Schaap et al., 2013). Enfin, elle offre l'opportunité de construire des stratégies d'adaptation, correspondant à des articulations de leviers d'adaptation, sur une base nuancée et pragmatique (Magnan, 2009).

3.3 Des outils pour combiner modélisation et participation

Une démarche de modélisation participative fait appel à différents outils dont Voinov et al. (2018) dressent une liste non exhaustive, pour réaliser différentes étapes du processus (Figure 1.9). L'étape de collecte d'information peut se dérouler sous la forme classique d'enquêtes ou d'entretiens, mais aussi plus récemment par *crowdsourcing*¹⁶ pour acquérir des connaissances concernant le problème étudié (perceptions, données, acteurs, etc.). L'orchestration des échanges (*brainstorming*, facilitation, jeu de rôle) est transversale à l'intégralité du processus. Elle vise à éliciter et échanger les différents types de connaissances par l'intermédiaire de supports de discussion (cartes, plateau de jeu, post-it, etc.). La modélisation se déroule au minimum sous une forme qualitative (carte mentale (Novak and Cañas, 2008), diagramme causal (Lane, 2008), etc.) et peut se poursuivre par une phase semi-quantitative (*fuzzy cognitive mapping* (van Vliet et al., 2010), scénarisation (Alcamo, 2009), etc.) ou quantitative (système d'information géographique, modèle multi-agent (Bonabeau, 2002), modélisation intégrée (Haasnoot et al., 2014), etc.).

Ainsi, le déroulé d'un processus de modélisation participative fait appel à différents outils, à différents moments de l'étude, et de manière itérative ou rétroactive (Figure 1.9). La flexibilité de la démarche constitue un point clé de sa réussite, pour à la fois adapter les outils aux objectifs de l'étude, et moduler les objectifs de l'étude aux ressources disponibles. Un certain nombre de bonnes pratiques sont décrites dans l'encadré 1.1.

A ma connaissance, il n'existe que deux études ayant mobilisé ces types d'outils pour l'étude de l'adaptation au changement climatique des systèmes viticoles. Delay et al. (2015) ont développé un modèle multi-agents au sein de l'appellation Banyuls-Collioure (39 km²). Ils ont étudié le déplacement en altitude du vignoble en réponse aux effets du changement climatique sur l'acidité des vins, et des stratégies de rémunération de la cave coopérative. Tissot et al. (2017) ont également développé un modèle multi-agents à l'échelle de la parcelle viticole pour prendre en compte l'impact de variables environnementales (température, pluie, eau du sol, etc.) sur les itinéraires techniques à l'échelle d'un terroir viticole dans la Loire (1 km²).

¹⁶Collecte de données par un grand nombre de personnes (« crowd ») non-professionnelles (Minet et al., 2017)

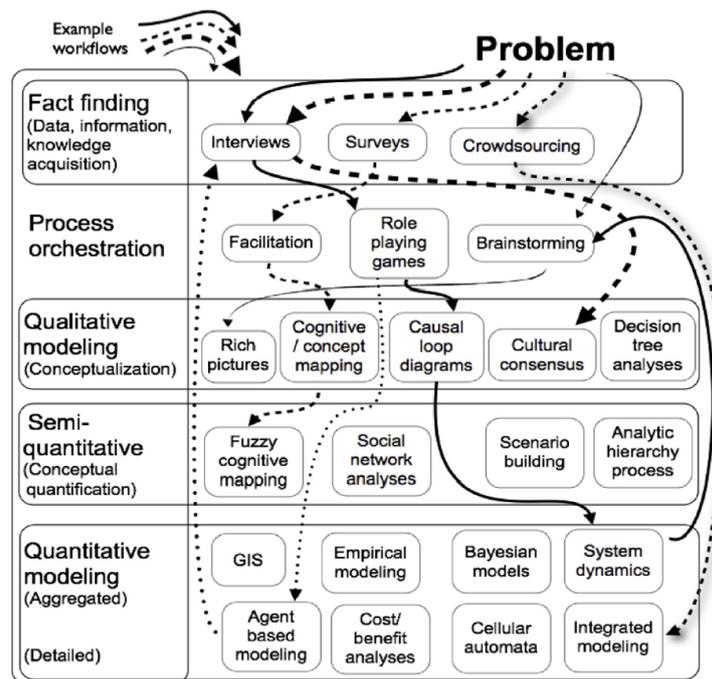


Figure 1.9 Typologie des outils utilisés en modélisation participative avec des exemples d'articulation au sein de processus (issu de Voinov et al. 2018)

Encadré 1.1

Voinov (2008) rappelle les bonnes pratiques pour une démarche de modélisation participative réussie :

1. Ouverture et représentativité des opinions
2. Crédibilité scientifique
3. Objectivité du facilitateur
4. Transparence sur la démarche et le modèle
5. Compréhension des incertitudes
6. Flexibilité du modèle pour incorporer de nouveaux apports des participants
7. Adaptabilité du modèle par sa compréhensibilité et sa documentation
8. Intégration du savoir des parties prenantes
9. Influence des résultats du modèle sur la prise de décision

4 Définition de la problématique

Au vu des éléments bibliographiques mis en lumière ci-avant, la conception de systèmes viticoles adaptés au changement climatique nécessite deux grands types de travaux : (1) la mise en œuvre d'une approche spatiale combinant différents leviers d'adaptations à différentes échelles, et (2) une hybridation entre les connaissances locales sur les systèmes actuels et leurs évolutions possibles, et les apports de la modélisation pour l'évaluation quantitative de ces systèmes sous conditions climatiques futures.

Il convient tout d'abord de réfléchir à la combinaison de leviers d'adaptation dans le temps et dans l'espace. L'exploration de ces combinaisons, qui seront dénommées dans la suite de ce manuscrit « stratégies d'adaptation », demande une réflexion à l'échelle du paysage, qui est le support des activités agricoles, où interagissent les processus biophysiques, les pratiques culturelles et les acteurs (Benoît et al., 2012). Au sein du paysage s'exprime la diversité des systèmes viticoles selon des variables physiques (ex. type de sols, topographie, exposition), techniques (ex. mode de conduite, irrigation, travail du sol) et institutionnelles (ex. aires d'appellation, bassins de collecte d'une coopérative). Le premier objectif de cette thèse est donc de construire des stratégies d'adaptation au changement climatique qui prennent en compte ces considérations spatiales, ainsi que les interactions entre plusieurs échelles (parcelle, exploitation, bassin versant).

Ensuite, l'évaluation de ces stratégies d'adaptation requiert des outils de simulation pour quantifier et comparer leurs effets selon les projections climatiques fournies par le GIEC. Ces modèles doivent permettre de prendre en compte les spécificités locales (problématiques, adaptations) afin de fournir une information pertinente aux acteurs (viticulteurs, conseillers, animateurs agro-environnementaux, décideurs politiques, chercheurs). C'est pourquoi le deuxième objectif de cette thèse est de proposer une démarche combinant une approche participative avec des modèles préexistants ou originaux, pour co-construire et évaluer des stratégies d'adaptation à l'échelle d'un paysage.

Cette démarche est mise en place au sein d'un territoire réel, le bassin versant du Rieutort, d'une taille de 45 km², dont 80% des surfaces cultivées sont en vignes. Située en région méditerranéenne, cette étude se focalise sur la gestion de la ressource en eau, en tant que principal enjeu du changement climatique pour la production viticole. Au travers de ce cas d'étude, je formule la problématique suivante :

Dans quelles mesures la combinaison de changements techniques à la parcelle, et leur distribution dans le paysage, peut-elle contribuer à l'adaptation de la viticulture au changement climatique ?

Je subdivise cette problématique en trois questions de recherche pour lesquelles je formule une ou des hypothèses. A chaque hypothèse correspond une démarche de vérification.

- **Question de recherche 1** : quels sont les leviers d'adaptation au changement climatique en viticulture et comment sont-ils évalués ? Je fais l'hypothèse que les précédentes études sur l'adaptation au changement climatique en viticulture montrent la nécessité de combiner des leviers d'adaptation. Cette question est abordée sous la forme d'une revue systématique (Chapitre 2).
- **Question de recherche 2** : comment quantifier les interactions multi-échelles entre leviers d'adaptation au sein d'un territoire, dans un contexte de changement climatique ? Je fais l'hypothèse que le couplage de modèles rendant compte (i) du bilan hydrique, (ii) de la réponse du rendement à l'eau, et (iii) de la répartition spatio-temporelle des pratiques culturales dans le paysage, permet de simuler des performances-clés - agronomiques, économiques, environnementales - des stratégies d'adaptation, dans le contexte du changement climatique. Pour répondre à cette question, j'ai couplé différents modèles existants ou nouvellement développés pour réaliser des simulations mobilisant les projections climatiques issues d'un modèle régional du climat (Chapitre 4).
- **Question de recherche 3** : comment construire et évaluer des stratégies d'adaptation avec les acteurs ? Je fais l'hypothèse que la co-construction de stratégies d'adaptation avec les acteurs permet d'identifier leurs opportunités, leurs contraintes et les leviers mobilisables à différentes échelles. Ses éléments peuvent ensuite être inclus dans des simulations numériques pour analyser les performances de ces stratégies d'adaptation. Ces hypothèses sont testées au cours de la démarche participative mise en place avec les acteurs (Chapitre 5).

Chapitre 2

Evaluer les adaptations au changement climatique en viticulture – une revue systématique

Ce chapitre est dédié à l'état de l'art, sous la forme d'une revue systématique, de l'ensemble des leviers d'adaptation au changement climatique envisagés dans le secteur viticole, ainsi que sur les méthodes mobilisées pour les évaluer.

La caractérisation des méthodes d'évaluation a permis de mettre en évidence que le nombre de leviers testés est important mais que la proportion de leviers évalués quantitativement reste faible. Dans quelques rares études, la combinaison des leviers d'adaptation à court et long termes (localisation, densité de plantation, irrigation, gestion du sol et du couvert végétal, etc.) permet de trouver des compromis locaux entre la disponibilité future de l'eau et la productivité de la vigne. Cependant, nous montrons que les méthodes actuellement déployées ne permettent pas d'évaluer ces combinaisons de leviers, et ne considèrent que peu le contexte local. Nous concluons que le développement d'approches considérant à la fois des adaptations et des échelles complémentaires, est essentiel pour fournir des informations pertinentes aux décideurs de la filière vitivinicole.

Ce premier travail a été publié dans la revue *Frontiers in Plant Science* en janvier 2021 dans le numéro spécial « Resilience of grapevine to climate change from plant physiology to adaptation strategies »

Référence : Naulleau A., Gary C., Prévot L. et Hossard L. (2021). Evaluating Strategies for Adaptation to Climate Change in Grapevine Production – A Systematic Review. *Frontiers in Plant Science*, vol. 11:607859. doi: 10.3389/fpls.2020.607859

Abstract

In many areas of the world, maintaining grapevine production will require adaptation to climate change. While rigorous evaluations of adaptation strategies provide decision makers with valuable insights, those that are published often overlook major constraints, ignore local adaptive capacity, and suffer from a compartmentalization of disciplines and scales. The objective of our study was to identify current knowledge of evaluation methods and their limitations, reported in the literature. We reviewed 111 papers that evaluate adaptation strategies in the main vineyards worldwide. Evaluation approaches are analyzed through key features (e.g. climate data sources, methodology, evaluation criteria) to discuss their ability to address climate change issues, and to identify promising outcomes for climate change adaptations. We highlight the fact that combining adaptation levers in the short and long term (location, vine training, irrigation, soil and canopy management, etc.) enables local compromises to be reached between future water availability and grapevine productivity. The main findings of the paper are threefold: (1) the evaluation of a combination of adaptation strategies provides better solutions for adapting to climate change; (2) multi-scale studies allow local constraints and opportunities to be considered; and (3) only a small number of studies have developed multi-scale and multi-lever approaches to quantify feasibility and effectiveness of adaptation. In addition, we found that climate data sources were not systematically clearly presented, and that climate uncertainty was hardly accounted for. Moreover, only a small number of studies have assessed the economic impacts of adaptation, especially at farm scale. We conclude that the development of methodologies to evaluate adaptation strategies, considering both complementary adaptations and scales, is essential if relevant information is to be provided to the decision-makers of the wine industry.

Keywords: viticulture, management practices, drought, adaptation evaluation, climate change, farm.

1 Introduction

Climate change adaptation is a key to the future of agriculture, a particularly vulnerable economic sector that depends heavily on weather and climatic conditions. Climate change adaptation can broadly be defined as "*the set of actions and processes that societies must take to limit the negative impacts of the changes and maximize their beneficial effect*" (Carter, 1996). In the case of grape growing, the potential adaptation levers are numerous, encompassing both the temporality of technical operations along the production chain – from plantation to annual crop management and winemaking –, and their spatial

variations due to the existing diversity of cropping systems and the close link between localization and technical adaptation (Viguie et al., 2014). It is thus interesting to understand how the research on grapevines examines management practices as well as socio-economic and cultural factors, to propose and evaluate strategies of adaptation to climate change.

It is essential that adaptation evaluation follow a comprehensive path to the understanding of climate change impacts. In the past three decades, an abundant literature – both scientific and technical – has been published on the impacts of climate change in viticulture (Mosedale et al., 2016). These impacts have been established from experiments in controlled conditions (Bindi et al., 2001; Moutinho-Pereira et al., 2009, 2010; Carvalho et al., 2016), the design of suitability maps based on bioclimatic indices (Fraga et al., 2012b; Hannah et al., 2013), or crop modeling (Lobell et al., 2006; Moriondo et al., 2015). The major trends identified are: a 50% increase of biomass production in an elevated CO₂ environment (Bindi et al., 1996); a 3 to 4 days per decade advancement of the vegetative and reproductive cycle due to higher temperatures (Caffarra and Eccel, 2011); and a higher risk of water stress impacting yield in quantity and quality (Jones et al., 2005; Schultz, 2010; Mosedale et al., 2016; van Leeuwen and Darriet, 2016). Among these three main factors (biomass increase, cycle advancement, and water stress), the latter is the most preoccupying, as water resources are particularly vulnerable in most grape-producing areas, which are in Mediterranean climates (Medrano et al., 2015).

Although vineyard water management has been a core subject of interest for decades with regard to controlling wine quality, today climate change and the resulting water scarcity threaten yield and wine quality on an unprecedented scale (IPCC, 2015). This has led to studies focusing on various but complementary scales. At field scale, irrigation is one of the most effective tools to limit adverse effects of water scarcity. Medrano et al. (2015) reviewed the different irrigation management techniques designed to enhance water use efficiency (e.g. deficit irrigation, partial root-zone drying, water re-use). They also explored soil and cover crop management as a way to maximize green water use. Palliotti et al. (2014) listed the impacts of various canopy management practices to delay the advancement of ripening due to temperature and to water deficit. The selection of drought-tolerant grape and rootstock varieties (Duchêne et al., 2010; Romero et al., 2018) has also been studied. At farm scale, the study of the socio-ecological system allows different types of adaptations like wine-making innovation, yield limitation, diversification and so on to be included (Nicholas and Durham, 2012; Lereboullet et al., 2013b). At regional scale, the migration of viticulture production towards higher elevation and/or higher latitude regions is also considered as an adaptation strategy (Hannah et al.,

2013; Delay et al., 2015). We can thus see that there are already many opportunities for implementing a wide diversity of adaptation levers to improve the management of viticulture under future climatic conditions.

These studies are however often scattered across disciplines and have little regard for the wide diversity of winegrowing systems or for the spatial heterogeneity of water resources and climate change impacts. The focal research question is now: *how does the current body of literature on the evaluation of adaptation integrate the possible trade-off between adaptations, considering both time and space?* To address this question, the present study investigates the current literature to determine the ways in which adaptation levers and scales can be integrated and evaluated, and in which integrative approaches may be further developed. Recently, Santos et al. (2020) provided an updated overview of adaptation levers in viticulture on the basis of results of relevant and illustrative research. The wide-ranging scope of their review does not allow an exhaustive compilation of previous studies. In this article, we propose an exclusive compilation of adaptation evaluation only. We aim to reach both researchers and policy makers by providing a comprehensive review of the current adaptation strategies and methodologies. We explicitly focus on the adaptation to water scarcity since: (1) water resources are projected to be strongly limited by an increase of water demand and a decrease of water availability under future climatic conditions (IPCC, 2015); (2) water availability and water management studies require spatial and temporal variations to be considered explicitly; and (3) we assume synergies and trade-offs to exist among the numerous adaptation levers proposed at different scales (water storage/competition, water use efficiency/water needs, etc.). Here we specifically discuss how current approaches and knowledge about adaptation could be integrated into locally specific adaptation evaluation in order to provide relevant information to decision-makers.

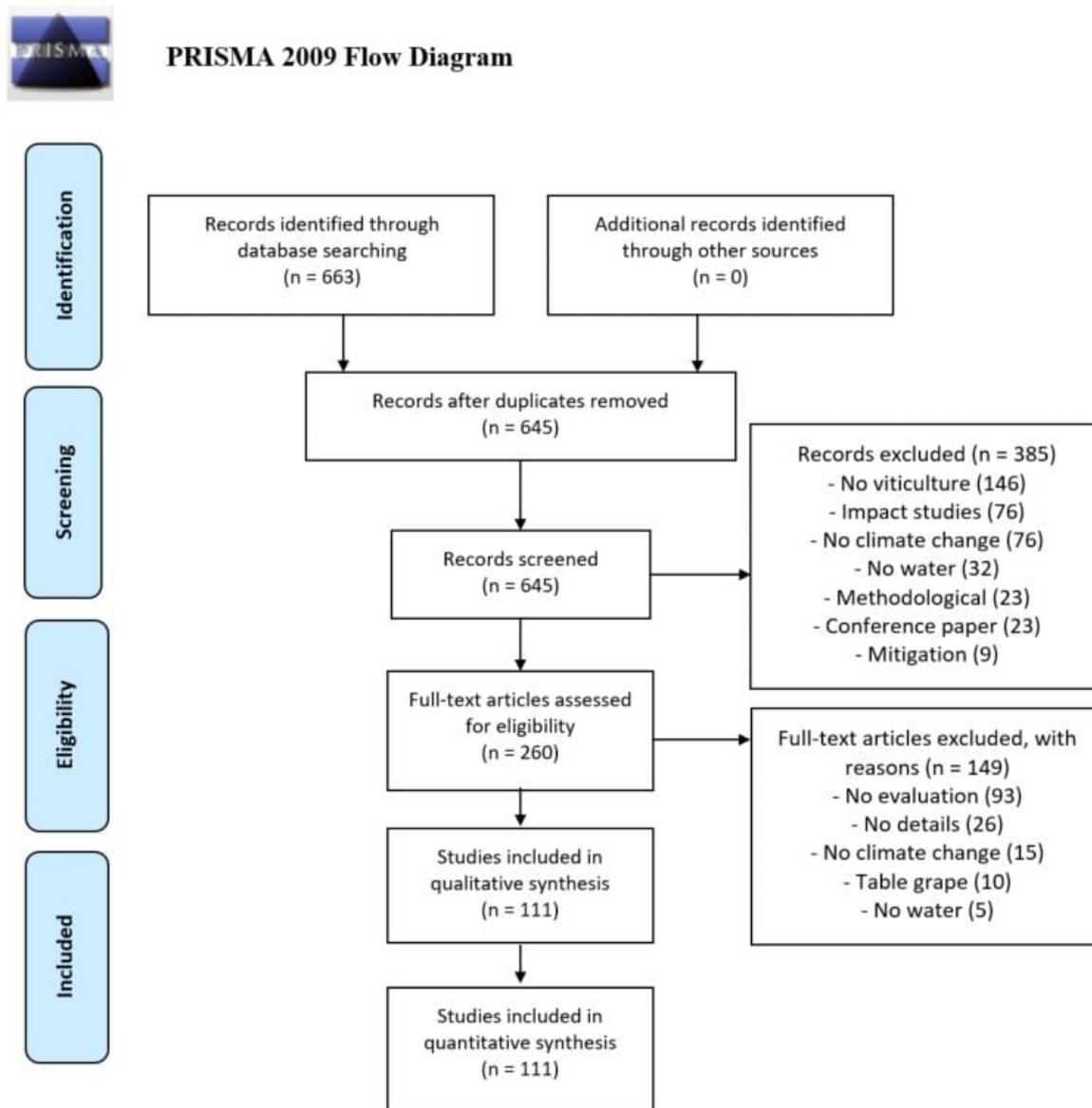
The present paper is structured as follows. In section 2, we present the methodology we used to select and analyze the available publications. In section 3, we synthesize the literature on adaptation strategies, highlighting the potential synergies and trade-offs when combining levers and scales. In section 4, we detail the various methodologies proposed for assessing the impact of adaptation strategies. Section 5 discusses possible future prospects.

2 Methods

2.1 Article selection and analysis

In this review we applied systematic methods for document selection and inclusion, and we mixed qualitative and quantitative analyses. The literature search, conducted in June 2019 in the Clarivate Analytics' Web of Science (formerly operated by the Institute for Scientific Information) for the whole available period (1955-2019), included peer-reviewed papers, working papers, and conference presentations. The research equation was divided into three types of keywords delimited by the operand "AND" and applied on TOPIC. The first part of the equation referred to climate change "climat* NEAR chang* OR global* NEAR warm*", the second part referred to wine-growing systems "wine* OR vine* OR grape* OR viti*", and the third part referred to adaptation or water management "water* OR adapt*". The choice to put the operand "OR" between adaptation and water management allowed us to include studies focusing solely on water management as well as studies that considered water management practices among more general adaptive strategies. We did not specify the study scale as our objective was to compare adaptation studies at various scales, from the plant to the region. To reduce the risk of missing relevant papers, we verified that the most cited references in the collected articles were present in the search results. The initial search yielded 645 results, duplicates excluded.

Title and abstract were scanned for their relevance, articles requiring further consideration were shortlisted, and full papers were accessed. For this review, we excluded papers that did not match the following selection criteria: (1) focused on wine grape, not table grape, production; (2) construction or evaluation of adaptation strategies at the core of the study, not only in a discussion after an impact study; and (3) at least one adaptation to water scarcity was included. A total of 260 articles remained after this first selection and were read in full. Only the ones where adaptation was explicitly evaluated were included in the present study; in other words, adaptations were explicitly projected under future climatic conditions (data-based or not) and their impacts were either quantified or qualified regarding their feasibility evaluation. Our final dataset included 111 references (Figure 2.1; complete list in Appendix B - Supplementary Table 1). First, we used the information from the Web of Science database to characterize the set of literature on adaptation for: authors, title, publication year, journal, web of science category, first author localization. We then described each of the 111 studies with categorical variables (Table 2.1). Analyses were performed with the R software version 3.5.1 (Team, 2018), and diagrams with the "ggplot2" R package (Wickham, 2016) , and the "VennDiagram" R package (Chen, 2018).



From: Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, The PRISMA Group (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med* 6(7): e1000097. doi:10.1371/journal.pmed.1000097

For more information, visit www.prisma-statement.org.

Figure 2.1 PRISMA flow diagram showing selection of papers for the final dataset (n=111), (Moher et al., 2015)

Table 2.1 List of the recorded information of the final dataset (n = 111).

Variable	Category
On Adaptation:	
Crop	Grapevine and others crops (including forestry)
Variety	Grape variety (e.g. Shiraz, Tempranillo)
Adaptation	Deficit irrigation, drought tolerant variety, etc. (complete list in Figure 2.3)
Studied area	One or several countries, worldwide (if concerns all the main viticultural areas)
On methodology:	
Scientific approach	Experimental, modeling, expert judgement
Climate data source	Meteorological data, perceptions, climate model
Study scale	Plant, Field, Farm, Region
Evaluation criteria	Physiological, agronomical, economic, environmental (detailed list in Appendix B - Suppl. Table 2)

Second, we extracted two sets of variables (Table 2.1). The first set of variables concerns the adaptations. Adaptations were first categorized according to their long- (LT) or short-term (ST) aspects. LT concerned site-specific planting choices that allow viticultural suitability to be increased, e.g. the environmental conditions in which grapevines could grow. ST concerned the flexible management that allows vine productivity to be adapted to the yearly specific climatic conditions. We then identified various adaptation categories according to their associated technical operations (e.g. fertilization, mulching, irrigation strategy, etc.). The context of the evaluation (studied area, variety, other crop considered), as well as the main impacts of the adaptation were also described.

We also performed an in-depth quantitative analysis focusing on the impacts of adaptation levers on five main outputs from plant to region scale: grapevine water status, phenology, yield, berry quality (sugar content and acidity) and freshwater ecosystem (streamflow, pollution). These outputs were chosen because they were the main evaluation indicators. At least one of these outputs had been quantitatively evaluated in 43 studies, and the results of these studies were extracted. Each result (combination of an adaptation, an output and an experimental condition (year, site, simulation)) was expressed as the absolute and/or relative effects of adaptation compared to the control. We classified results according to their “positive” or “negative” effects on the outputs with regard to climate change outcomes. Positive or negative effects were not systematically similar to an “increase” or a “decrease”, depending on the considered output. For example, positive effects on phenology is a delayed occurrence of phenological stages, as climate change tends to accelerate the phenological cycle. The positive effects on water status and yield are the reduction of water stress and the increase of yield, respectively. The positive effects on

berry quality are a decrease of sugar content and an increase of acidity. Negative effects on freshwater ecosystems are the reduction of streamflow and the increase of pollution. Non-significant results are classified as “neutral”. Section 3.3 presents the results, describing how the combination of adaptation levers at long and short term allows a better adaptation to climate change.

The second set of variables concerns the evaluation methods (Table 2.1). We excluded the 18 review papers from our analysis (18 out of the 111 papers), as we did not consider reviewing as a way to evaluate an adaptation. Four types of information were collected: the scientific approach, the climate data source, the study scale, and the evaluation criteria. First, the scientific approach is characterized according to the three categories described in Carter (1996): experimentation, impact projections (*i.e.* modeling) and expert judgement. Second, the performance of an adaptation under future climatic conditions depends largely on the data used to define those conditions. Climate data sources are classified by Carter (1996) into three categories: synthetic scenarios that consist of current meteorological data adjusted systematically (e.g. +2°, -10% annual precipitation, etc.); analogue scenarios based on the identification of current climatic regimes that may occur in the future (*i.e.* perception); and data from climate models. Third, Neethling et al. (2019) have demonstrated the importance of scales to assess expected impacts, understand uncertainty, and frame sustainable responses over space and time. Herein, we classify the articles according to the scales of the studied processes: the plant scale corresponding to the eco-physiological processes (e.g. gas exchange, photosynthesis, water status); the field scale corresponding to the agronomic processes (e.g. soil properties, yield, berry composition); the farm scale corresponding to socio-economic processes (e.g. income, cost, labor); and the region scale corresponding to agro-eco-environmental processes (e.g. streamflow, wine market, regulation). At each scale, the evaluation criteria, *i.e.* the specific measured, simulated, or observed outputs of the studies are listed.

2.2 Overview of the final selection of articles

In our database, the first journal article to focus on adaptation of grapevine to climate change was published in 2006 (Belliveau et al., 2006), ten years after the first impact study of climate change in viticulture (Bindi et al., 1996). The number of papers has increased steeply since 2016 (Figure 2.2A).

Over the whole set of articles, authors from the Mediterranean area, *i.e.* Spain, Portugal, Italy, and France, accounted for 58 % of the articles, followed by other major viticulture regions in the world, mainly Australia, USA, Canada, Germany and Chile

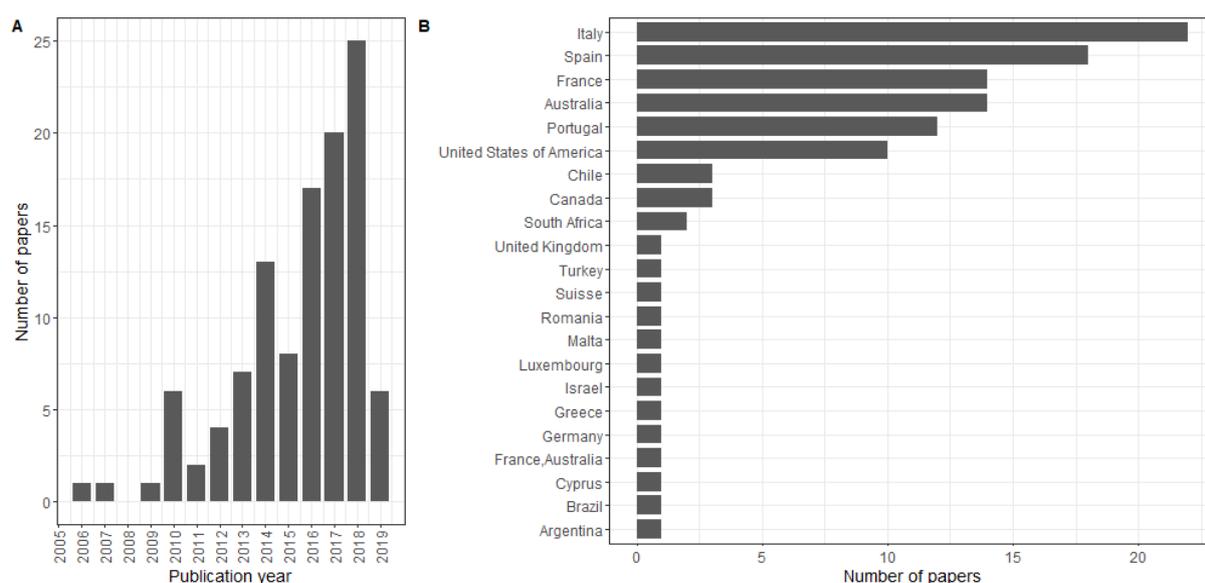


Figure 2.2 Presentation of the article pool (n=111) regarding (A) the publication year (count stopped in June 2019) and (B) country of the 1st author

(Figure 2.2B). Most of the studies concern one region (87 papers) while a few others are comparative studies between countries (Australia and France (Lereboullet et al., 2013b), Germany and Argentina (Uliarte et al., 2013), France, Italy and Germany (Battaglini et al., 2009)) or a worldwide analysis (Hannah et al., 2013). The two journals that publish the most on the adaptation of viticulture to climate change are grapevine-specialized journals, namely *Australian Journal of Grape and Wine Research* and *Oeno One* (11 and 8 papers, respectively). *Agricultural Water Management*, *Scientia Horticulturae* and *Regional Environmental Change* published 6 papers each.

3 Adapting viticulture to future water scarcity

In the reviewed scientific literature, short-term (ST) and long-term (LT) adaptations, implemented respectively during the grapevine growing season and at vineyard plantation, were evaluated. Long-term adaptations concern: Site selection (LT1), consisting in the relocation of vineyards; Plant material (LT2), consisting in the implementation or creation of adapted grapevine cultivars and rootstock; Vineyard design (LT3), which implies changes in density, row orientation, training system; and Farm strategy (LT4), which includes wine-market orientation and diversification. Short-term adaptations concern: Irrigation (ST1); Soil management (ST2) concerning both soil surface (cover crop, mulching, tillage, etc.) and fertilization management; Canopy management (ST3); and Harvest and post-harvest management (ST4).

Figure 2.3 represents the occurrence of each adaptation in the studied dataset. One study could be counted several times as it examined more than one adaptation. Long-term and short-term adaptations were studied almost equally with 93 occurrences of LT adaptations, and 117 occurrences for ST adaptations. We recorded 32 individual levers limiting adverse effects of climate change on water resources in the vineyard. Irrigation was the most cited adaptation (55 studies), with a wide diversity of individual levers: on irrigation strategies (deficit irrigation, partial root drying irrigation, water spraying) and water sources (water re-use, water reservoir). The plant material ranked 2nd (41 studies), and could be classified in three types of adaptation lever: drought-tolerant rootstocks; late-ripening varieties; and drought-tolerant varieties. Last of all came canopy management, soil management, vineyard design, and site selection, which received an intermediate amount of attention (19 to 32 studies), whereas farm strategy and harvest management were given significantly less attention (< 10 studies each).

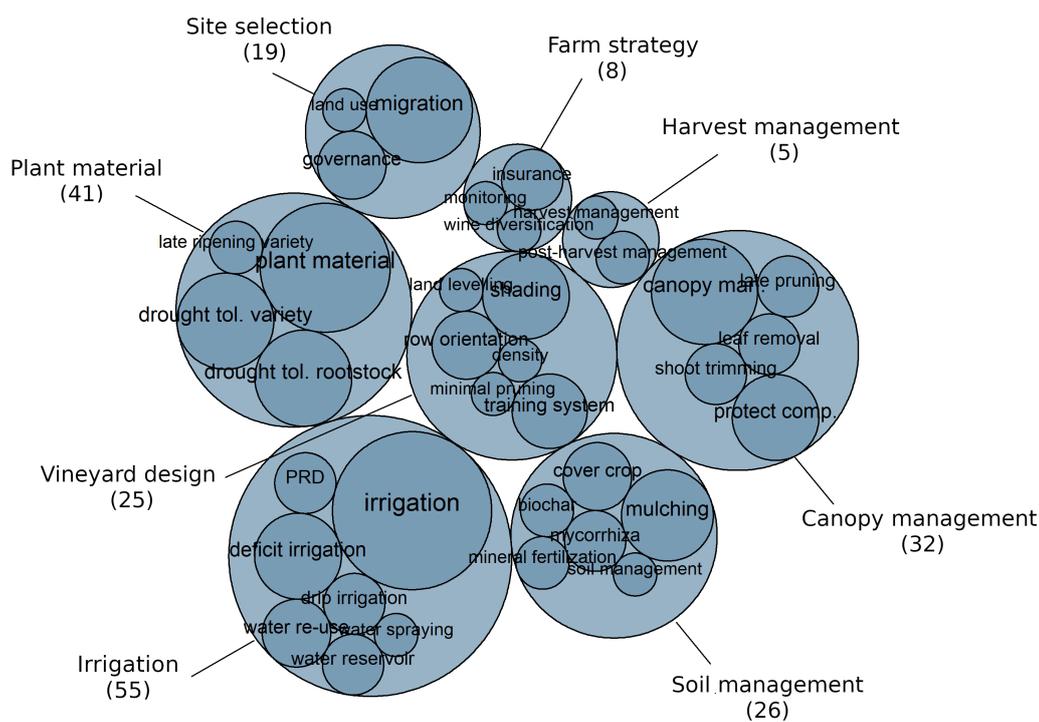


Figure 2.3 Number of studies that evaluate each adaptation lever. The size of the circles is proportional to the number of studies evaluating the levers. The number of studies appears in brackets for the main categories. One study can appear several times, as it may evaluate several adaptations.

In the selected literature, 60% of the articles considered only one adaptation lever, 20% considered an association or comparison of two levers, and 7% considered three levers.

The 17 remaining articles proposed a combination of several levers (up to 14), but in these articles, their evaluation was only qualitative.

3.1 Combination of long-term adaptations to increase viticultural suitability (LT)

3.1.1 Site selection (LT1)

Viticultural suitability has been examined mostly under future climatic conditions (Fraga et al., 2012a; Hannah et al., 2013; Moriondo et al., 2013). Suitability maps provide spatial representations of bioclimatic indices for describing changes in the suitability of land for viticulture (Mosedale et al., 2016). Viticultural suitability is predicted to decrease in main wine-producing areas (25-73%), leading to a reconfiguration of vineyard locations worldwide. New areas are expected to become suitable, multiplying by a factor of 2 to 3 the wine-growing areas in Northern Europe, New Zealand and Western North America (Hannah et al., 2013). New suitable areas concern higher altitudes, as well as latitudes where annual precipitations are higher and grapevines suffer less from high temperatures. Such alarming conclusions are however controversial within the scientific community (van Leeuwen et al., 2013).

The main limitation of these studies is the fact that they are based solely on bioclimatic indices (temperature and precipitation), without considering (1) specifically local conditions, (2) competition between various land uses, and (3) winegrower adaptive capacity to limit migration. First, local conditions (e.g. soil available water capacity (SAWC), irrigation water availability, sun exposure) are not integrated into suitability mapping studies. Second, as lands that have recently become suitable for grapevine are currently – or will become – suitable for other crops, conflicts may rise around agricultural land use and conservation policies (Hannah et al., 2013; Fuhrer et al., 2014). Third, Delay et al. (2015) demonstrated the role of stakeholders' organization for the maintenance of viticulture in unsuitable areas, with the example of the role of cooperatives, not only in conserving production levels but also in respecting the emblematic viticultural landscape structure.

In case of migration, the future of abandoned vineyard areas is still an unknown. Whereas other crops could not be considered without irrigation, forestry (pine/eucalyptus) appears as a solution (Carvalho-Santos et al., 2016). Otherwise, stakeholders predict a return to shrublands with consequences on the local economy, tourism, and fire risk (García-Ruiz et al., 2011).

3.1.2 Plant material adapted to site selection (LT2 * LT1)

As the climate warms up, the phenological stages are advanced, generating concerns in the spring season when grapevines become more exposed to late frosts, and in summer when climatic conditions during berry ripening are less favorable (e.g. high night temperatures and water deficit). The existing phenological diversity among grapevine cultivars offers an opportunity for climate change adaptation, to limit the loss of suitable areas for grapevine (Wolkovich et al., 2017). However, suitability maps do not integrate this phenological diversity into their indicators, nor do they integrate the PDO delimitation, which restricts the implementation of specific cultivars.

The IPCC has emphasized that Mediterranean climate areas are more likely to face an increase of drought and a reduction of renewable surface water and groundwater resources in the future (IPCC, 2015). Accordingly, plant material (cultivar and rootstock) should be selected for their drought tolerance. There are many studies comparing the behaviors of various grapevine genotypes under water-restricted conditions (e.g. Tomás et al. 2014; Vaz et al. 2016). Empirical knowledge of winegrowers is reported by Lereboullet et al. (2013b) in Australia: *“in 2011, many producers were starting to plant alternative Mediterranean varieties such as Grenache, Tempranillo or Mourvedre that offer a better resilience to water stress than Shiraz”*. However, the understanding of the genetic factors relevant to water stress tolerance is still limited, and quantification of yield response to water scarcity for various cultivars and in interaction with other climate variables remains difficult. An attempt to model these factors was undertaken in Tuscany. The authors found that the combination of partial uphill relocation, combined with the expansion of a drought-tolerant variety leads to a higher economic efficiency than each adaptation separately (Zhu et al., 2016). These results are however based on a major assumption that the yield of the drought-tolerant variety would not be affected by the climate change.

Duchene (2016) and Medrano et al. (2015) also highlighted the fact that rootstock-scion interaction plays a fundamental role in water use efficiency. Rootstocks have long been an unexplored field of research that is now increasingly being investigated for two reasons: its effect on root development and density, and therefore on the capacity to extract water from soil and to detect drought; and its effect on scion vigor, which influences light interception, carbon assimilation and consequently yields. Serra et al. (2014) and Zhang et al. (2014) reviewed and classified the current knowledge about the drought resistance of various rootstocks. Surprisingly, no reference to the grafting techniques (methods, period, height) have been mentioned in the selected literature, although it is a determinant of the plant's rootedness and the regulation of water flow (De Micco et al., 2018).

3.1.3 Vineyard design (LT3)

Plantation density has a direct effect on a vineyard's water consumption. The objective is to increase drought resistance by reducing the competition between vines. Two studies based on a water balance model highlighted the potential of low-density systems as an adaptation to future water scarcity. Pieri et al. (2012) tested two planting densities (3,000 and 9,000 plants/ha) in the five main viticultural regions of France, for three vine cultivars that differ in terms of their phenological timing. They found that reduced planting density allows grapevine water status to be maintained within moderate limits, even under future climatic conditions. Van Leeuwen et al. (2019) went further by evaluating the economic effects of a density reduction. When density was reduced by 50%, water deficit was also halved, leading to higher yield at plant scale but lower yield at field scale, offset by lower costs (e.g. pruning and trellising, labor, chemicals, etc.). This demonstrated the economic viability of low-density.

Hunter et al. (2016) studied the impact of row orientation on microclimatic conditions (temperature, wind) and vine physiological status. They highlighted a lower water stress for east-west orientation, which may be induced by row orientation. In Australia, Galbreath (2014) likewise showed that east-west row orientation limited canopy temperature increase. Row orientation, as well as drainage terraces, also have an effect on water balance by reducing runoff. A study in Spain showed that drainage terraces could be expected to limit runoff volumes of between 19 and 50% at the 2050 horizon, thus favoring infiltration and limiting soil losses (Concepción Ramos, 2016).

The vine training system determines above all the light interception and bunch sun exposure, and thus the completion of berry ripening. Palliotti et al. (2014) identified adapted training systems allowing for an optimal bunch microclimate under future climatic conditions. However, it is difficult to state which training system is better adapted to drought. The only reference to drought is to a lower leaf-to-air vapor pressure deficit. It is sometimes argued that goblet pruned vines are more drought resistant (van Leeuwen and Destrac-Irvine, 2017). We note a lack of comparison of the water use efficiency of different training systems, including traditional forms like goblet systems (Medrano et al., 2015). In Central Europe, under relatively cool climates, light pruning systems such as semi minimal pruning are promoted as an adaptation to climate change, as they present higher yields with lower alcohol degrees than vertical-shoot positioning systems (Clingeffer, 2010; Molitor et al., 2019). However, the large water requirements of such systems would not be adapted to rainfed systems under semi-arid climate.

Shading systems are proposed as adaptation to climate change, designed to limit the effects of high temperatures and to limit evapotranspiration. Experiments with shade (e.g. natural with agroforestry systems, artificial with nets, shading panels or photovoltaic panels) concentrate mainly on the effect of shade on the canopy temperatures. Overhead shade seems to be the most efficient way to decrease temperatures and water stress, as compared to full canopy shade, bunch shade, soil shade and side-canopy shade (Caravia et al., 2016). More studies on the relationship between timing and duration of shading, whole-vine and specific canopy portion shading, and analysis of technical feasibility of canopy shading (i.e. suitability of training systems, mechanization of net setting and removal, cost/benefit ratio, etc.) are needed (Palliotti et al., 2014).

3.1.4 Farm strategy in relation to planting choices (LT4 * LT1 * LT2 * LT3)

Like any economic activity, wine growing needs to be viable. On the one hand, adaptation strategies should be acceptable to the producers: cost/benefit ratio, working conditions (mechanization) and labor availability. Yet no quantitative evaluations of adaptation on farm systems have been found in literature. On the other hand, adaptation strategies should also be suited to consumers' preferences. As Belliveau et al. (2006) have shown in Canada, planting new varieties can minimize market risks but increase climate risks; but it can also reduce climate risks and create marketing difficulties. These considerations are spatially and temporarily difficult to reconcile.

The long-term adaptation of viticulture to climate change is a result of current planting choices: where (low land, uphill)? What (cultivar, rootstock)? How (orientation, density, training system)? For which type of wine? While little attention seems to have been paid to the combined effect of site selection and cultivar choice, the evaluation overall of the combined effect of various practices remains poor. Moreover, the proposed long-term adaptations are rarely balanced by considering the final production objectives and economic returns that are defined and expected at farm scale.

3.2 Combination of short-term adaptations to enhance flexible management (ST)

3.2.1 Combining irrigation with water-saving soil management practices (ST1*ST2)

Irrigation is part of most adaptation strategies proposed by stakeholders. Examples can be found in the South of France (Lereboullet et al., 2013b; Neethling et al., 2017), Australia (Lereboullet et al., 2013b; Galbreath, 2014), the USA (Nicholas and Durham,

2012), Italy (Sacchelli et al., 2016), Canada (Belliveau et al., 2006), and Spain (Alonso and Liu, 2013). However, irrigation needs, coupled with their possible satisfaction, are still not explored in socio-ecological studies. The main question remains: how much water do we need, now and in the future?

Two types of methodologies to assess future irrigation needs exist in the literature: experimental approaches and modeling approaches. Medrano et al. (2015) reviewed in detail the different irrigation strategies and their effects on physiological and agronomic parameters in field experiments. They concluded that regulated deficit irrigation (RDI) at an early or late stage is crucial for the sustainability of vineyards. They also detailed water saving practices – both agronomic techniques and genetic improvements – to increase water use efficiency under current climatic conditions. However, Bonada et al. (2018) showed that when dealing with climate change, elevated temperatures will increase water demand. Thus, the relationship between rainfall decrease and increase in irrigation needs is not straightforward. A modeling exercise by Fraga et al. (2018) highlighted that in some parts of Portugal required irrigation may exceed the reduction in precipitation, while irrigation could largely alleviate projected yield decreases. Based on the selected articles, we synthesized current and future irrigation needs according to the vineyard location, irrigation strategy and the different climate scenarios (Table 2.2).

Table 2.2 illustrates the small number of studies that quantify irrigation needs under future climatic conditions, especially those concerning grapevine deficit irrigation in Europe – currently mostly rainfed. Future needs tend to vary widely across regions and to be double current needs in European regions. Lower increases are forecast in Australia as the current requirements are already high.

In areas where future water requirements will exceed water availability, agronomic practices may decrease irrigation needs by increasing soil water capacity and/or decreasing water losses. Canopy shade cloth and soil plastic mulch result in a 50% reduction in water use without detrimental effects on plant physiology under irrigated vineyards in Chile, through a reduction of soil evaporation or of evaporative demand (Gil et al., 2018). Transparent plastic covering (TPC) has been reported to increase water use efficiency in vineyards in Brazil, by creating higher humidity and lowering evapotranspiration as compared to open field conditions (da Silva et al., 2018). The use of organic matter as compost increases the soil water storage capacity and reduces irrigation needs (Cirigliano et al., 2017). Tomaz et al. (2017) showed that the presence of a cover crop under irrigated conditions forces the vine root system, mainly its thinner roots, to seek water in increasingly deeper soil.

Table 2.2 Irrigation strategies (FI, Full Irrigation; DI, Deficit Irrigation; PRD, Partial Root Drying) and associated water requirements in different climate scenarios (SRES, Special Reports on Emission Scenarios; RCP, Representative Climate Pathway).

Reference	Location	Method	Irrigation strategy	Period	Climate scenario	Irrigation water requirement
Present						
(dos Santos et al., 2007)	Southern Portugal	Field experiment	FI 50% DI 50% PRD	2002 2002 2002		197 mm 99 mm 99 mm
(Savi et al., 2018)	Italy, NE	Field experiment	Summer supplemental irrigation	2015		20 - 40 mm
(Wenter et al., 2018)	Northern Italy	Field experiment	FI DI	2014-2015 2014-2015		72-262 mm 36-131 mm
(Trigo-Córdoba et al., 2015; Mirás-Avalos et al., 2016) (Aparicio et al., 2019)	Galicia, Spain Malta	Field experiment Cost-benefit analysis	DI	2012-2014 Present		50-79 mm 60 mm
(Gaudin and Gary, 2012)	Southern France	WaLIS model	DI	1972-2010		0-90 mm
In combination						
(Cirigliano et al., 2017)	Central Italy	Field experiment	DI DI + compost	2011-2013 2011-2013		125 - 591 mm 125 - 291 mm
Future						
(Kapur et al., 2007)	Apulia, Italy	Water balance model	FI FI	1970 2095	SRES A2 SRES A2	320 mm 480 mm
(Fraga et al., 2018)	Portugal	STICS model	DI	2041-2070	RCP 8.5	50-250 mm
(Phogat et al., 2018)	Australia	Hydrus 1D model	DI	2004-2015 2020-2039 2040-2059 2060-2079 2080-2099		350 mm 250-450 mm 260-460 mm 240-480 mm 280-500 mm

Few combined adaptations under irrigated conditions have been reported, while a broader focus of attention has been given to precision scheduling and timing of irrigation supply. A wide diversity of equipment is explored: subsurface, drip, sprinkler, gravity, high-pressure system. Concerning the timing factor, tools for measuring the water status of grapevines are being developed to determine the frequency of irrigation through direct measurement of plant and fruit parameters (Scholasch and Rienth, 2019).

3.2.2 Enhancing flexible management strategies in rainfed system

3.2.2.1 Soil management (ST2)

Soil management is crucial to reduce water losses. As half of the water needed by grapevines is provided by rain during fall and winter in Mediterranean climates (Flexas et al., 2010), the soil has a decisive role in buffering the mismatch between water supply and demand. Two main aspects are considered in the literature: the soil structure (porosity, stoniness, deepness) impacting its available water capacity and the soil's surface state, influencing infiltration and evapotranspiration.

In the selected literature, biochar is the most studied adaptation to improve soil structure. Biochar is a co-product of a thermochemical conversion of biomass, recognized to be a beneficial soil amendment which increases soil water retention (Amendola et al., 2017). Effects of biochar depend on its physical and structural elements, the rate of application, and the soil type (Baronti et al., 2014). While biochar is more efficient in sandy soils, the extent to which the soil's available water capacity could be improved in each production area, and whether it will be sufficient to counteract a decrease of rainfall during the vine cycle or not, is unknown. In any case, improving soil quality (organic matter and soil microbiology) will help to buffer the adverse effect of higher intra- and inter-annual climate variability.

The soil surface state largely influences the water balance (infiltration, runoff, soil evaporation). It is determined by soil type, technical operations (tillage, cover crop seedling, herbicide application) and rain intensity. Chrysargyris et al. (2018) found that no tillage compensated for the lack of irrigation, while slight tillage allowed for better rainfall infiltration. Cover crops are also promoted to enhance infiltration. The water competition induced by the transpiration of a cover crop could be limited by its partial or total destruction at the end of the rainy season. One potential adaptation measure to consider in further studies concerns mulches, that is, organic or inorganic products that may be placed on the soil surface. Mulches reduce soil compaction and retain soil moisture, regulate soil temperature and reduce evaporation. According to STICS

simulations, mulches may mitigate yield decreases by 10 to 25% in Alentejo vineyards in Portugal (Fraga and Santos, 2018).

3.2.2.2 *Canopy management (ST3)*

Canopy management determines water consumption by controlling the leaf area index and so the transpiration rate. The diversity of operations throughout the year (winter, before flowering, after flowering, until the last days before harvest) enables a wide range of processes (Figure 2.4) impacted by climate change (e.g. berry ripening, sun exposure) to be controlled. The expected results from applying these techniques are closely connected to the timing and intensity of the intervention, as well as to the vine's vigor, soil fertility and environmental factors, primarily rainfall (Palliotti et al., 2014).

Leaf removal after veraison is proposed as an adaptation to climate change, as it results in a reduction of sugar accumulation rates and a postponement of the harvest date without affecting yields (Poni et al., 2018). This has been shown by tests on irrigated Sangiovese vines in Italy (Valentini et al., 2019). Results are however more mitigated under rainfed conditions (Buesa et al., 2019), which highlights the importance of environmental context on the effect of such adaptation. Although late winter pruning helps to delay ripening (Petrie et al., 2017), excessive crop load, compared to soil resources, will ultimately have negative effects on yield and grape composition and cause a delayed ripening. Yet the boundary between an adequate and an excessive crop load is not clear-cut (Palliotti et al., 2014). Şerdinescu et al. (2014) recommended the reduction of bud load only in very dry conditions.

Anti-transpirants have been used to counteract drought as their application on leaves significantly reduces water loss and heat stress (Palliotti et al., 2013). Depending on the molecules, they act in two ways: a film polymer on the leaf surfaces (e.g. kaolin); or stomatal closing compounds. They also have positive effects on the control of sugar accumulation. Their effects on plant and fruit temperatures are more contrasted, due to their effects on stomatal aperture.

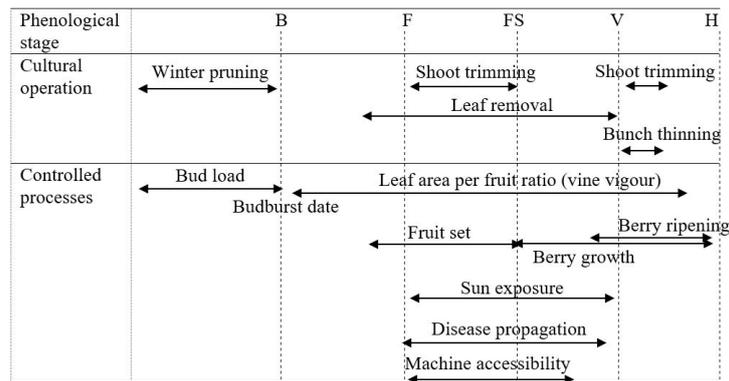


Figure 2.4 Technical operations on canopy and controlled processes (B: Budburst, F: Flowering, FS: Fruit Set, V: Veraison, H: Harvest)

3.2.2.3 Harvest and post-harvest management (ST4)

As the climate is changing, with higher temperatures and higher water deficits that tend to advance harvesting and affect grape composition, new harvesting management is needed. The main idea is to alter harvesting dates in accordance with temperatures (Alonso Ugaglia and Peres, 2017), but winegrowers have also envisaged other solutions. Neethling et al. (2017) identified that most adaptive responses occurred during harvest and winemaking. Harvesting with machines allows winegrowers to intervene rapidly (day and night), whereas manual harvesting systems are more restrictive. However, manual harvesting allows them to repeat the picking several times, and thus to select grape bunches that have reached their optimal maturity. Once the harvest is at the cellar, adaptations in the winemaking process are proposed. Dequin et al. (2017) recently reviewed winemaking practices adjusted to modified grape composition under climate change conditions (specific yeast strains with lower alcohol yield, membrane-based technologies to reduce the ethanol content and to increase the acidity, etc.).

3.3 Combination of long-term and short-term adaptations

The analysis of individual adaptation levers allows for potential beneficial combinations of short- and long-term adaptation to be identified. The individual effects of adaptation levers on five main outputs (water status, phenology, yield, berry composition and fresh-water ecosystem) are synthesized in Figure 2.5. The sources of information (papers) are detailed in Supplementary Figure 1 in Appendix B. The majority of the impacts of adaptations concerning water status and phenology showed an alleviation of water stress and a delay of phenology for all adaptations. However, the effects on yield of these different adaptations showed contradictory results. For instance, while vineyard design and canopy

management adaptations had positive effects on grapevine water status, impacts on yield are in some cases deleterious. We noticed also that the effect of irrigation on yield, which is the most studied adaptation lever, was not significant in half of the cases, thus showing that the positive effect of irrigation on yield may depend on the year and the location. The low number of articles that evaluate impacts of adaptation levers at regional scale through their effects on freshwater ecosystems is worrying, especially as all the currently available results showed negative impacts. Results on soil management adaptations were mostly not significant on grapevine outputs, while they show positive effects on soil specific outputs (data not shown).

Figure 2.5 allows us to identify possible tradeoffs between short-term and long-term adaptations. For example, while vineyard design adaptation (LT3) can have negative effects on yield, it could be compensated by irrigation (ST1). Likewise, the negative effect of irrigation (ST1) on berry composition could be offset by adapted plant material (LT2, e.g. drought tolerant rootstock). In the selected literature, long- and short-term adaptations were combined in the majority of studies that involved the stakeholders (Nicholas and Durham, 2012; Lereboullet et al., 2013b; Neethling et al., 2017). However, quantitative evaluations of these combinations are scarce. The combined effect of variety choice and irrigation treatment has been carefully studied by Carvalho et al. (2018). The same consideration appeared recently in rootstock selection: Romero et al. (2018) demonstrated the compromise between rootstock selection and well-designed deficit irrigation strategies that allow long-term yield-quality-efficiency and returns for the grower. Vine training is also expected to influence water irrigation needs. For instance, Clingeleffer (2010) found that minimal pruning, combined with PRD irrigation, significantly increases water use efficiency compared to spur pruned and controlled irrigation treatments.

The integration of long-term considerations when evaluating short-term adaptation is crucial when dealing with economic and regulatory aspects. For instance, an analysis of technical feasibility and the economic cost of irrigation infrastructure for various localities and types of production is still lacking. Beyond irrigation needs, the irrigation decision is dependent of water resources (limited or not) and water pricing policy (Olen et al., 2016). We note the necessity to integrate the decision model into the development of irrigation-based adaptation strategies. In a trial, Trigo-Córdoba et al. (2015) estimated that irrigation is not economically viable under the current conditions of Galicia vineyards, considering both yield and quality, even though there is a physiological need for irrigation. In the vineyard of the “Old World”, irrigation was recently authorized (since 1996 in Portugal and since 2006 in France) and is still limited in “Protected Designation of Origin” areas, which can considerably change the feasibility of irrigation-based adaptations.

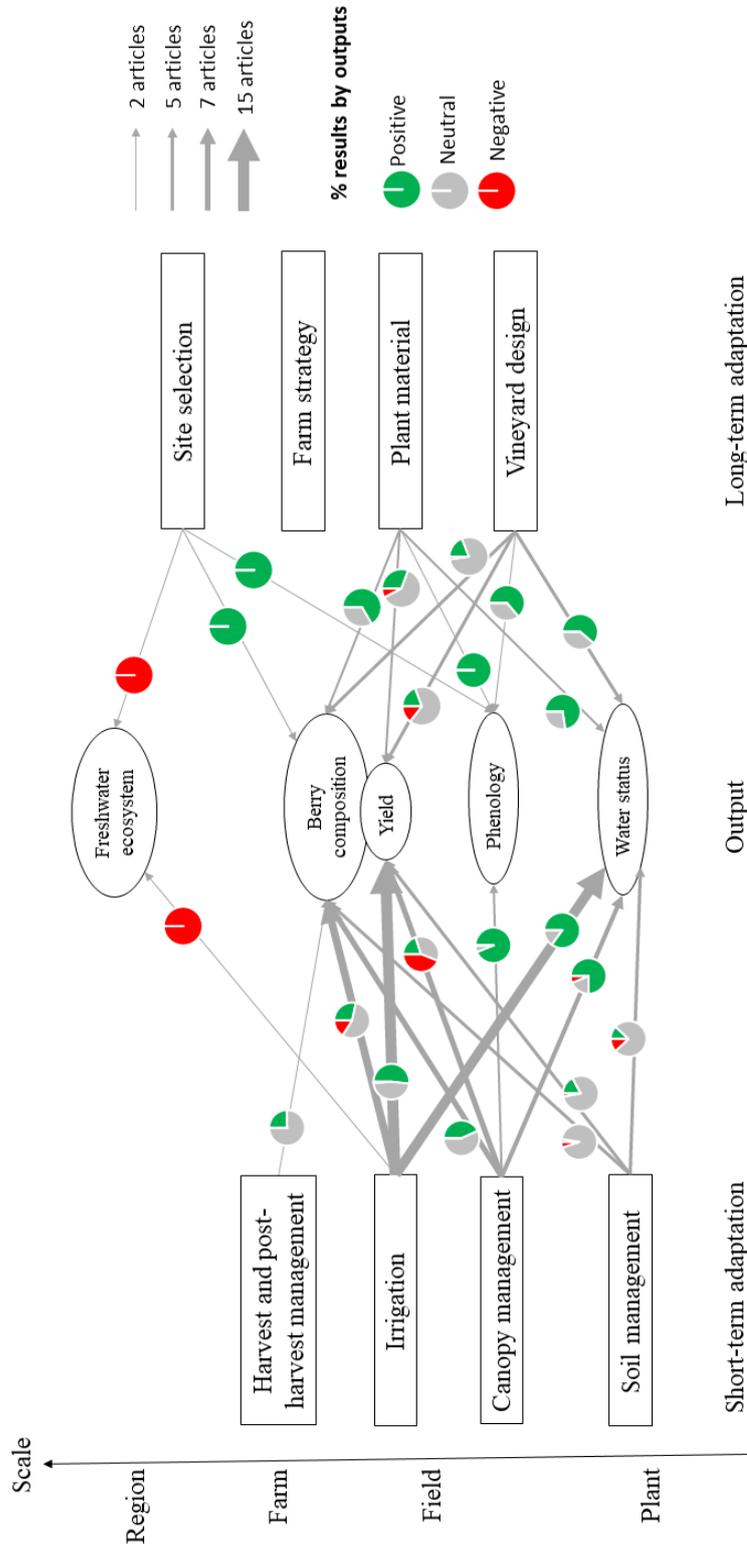


Figure 2.5 Number of articles and associated percentage of results indicating an effect of short-term and long-term adaptations on desired direction of outputs. Only significant effects ($p < .05$ when statistical analysis could be tested) are represented as positive or negative, and neutral means no significant effects. Positive effects on water status are those limiting water stress measured on the grapevine. Positive effects on phenology are those delaying phenological stages (budburst, veraison or maturity). Positive effects on yield are an increase of yield. Positive effects in berry composition concern the reduction of sugar content and the increase of acidity. Negative effects on freshwater ecosystem are those reducing streamflow or increasing pollution.

In addition to the economic aspect, some authors have looked at whether irrigation is an environmentally sustainable trend in semi-arid areas. One aspect is ecosystem protection, which was examined by Grantham et al. (2010), who evaluated the impact of small storage ponds on streamflow. They showed that strategic placement of storage ponds could reduce summer water withdrawals, thus protecting environmental flow. However, this could have an impact on winter flow. The development of high water-use efficiency systems in areas previously not irrigated still results in an increase of total water use. The second aspect deals with salinity problems, which appeared first in countries like Israel and Australia (Phogat et al., 2018). Model simulations indicate a steep increase of salinity in the root zone as rainfall-induced salt leaching declined significantly with climate change. The simulated seasonal average salinity increased three to four times compared to the baseline (Phogat et al., 2018). Adaptation strategies should include salinity tolerant rootstock, or the use of desalinated water (Aparicio et al., 2019).

4 Evaluating climate change adaptation in viticulture

4.1 Characterization of climate change

Characterizing future climatic conditions is the first step to evaluate an adaptation strategy, as its effectiveness will depend on local climatic conditions. Climate is a complex phenomenon involving many variables on different spatial and temporal scales. The ability to forecast climatic conditions is limited by the uncertainty about future greenhouse gas emissions and by the scientific uncertainty of their effects on climate and crops. The effects of combined climatic factors (e.g. higher CO₂ concentration with higher water deficit) need to be considered simultaneously. In addition, spatial resolution of climate information is crucial to predict local phenomena. The performance of an adaptation under future climatic conditions therefore depends largely on the data used to define future climatic conditions.

First, future climatic conditions are described as a systematic adjustment of present meteorological data (e.g. a temperature increase of 2°C, a 50% reduction of rainfall, etc.) in 35 studies in the article pool (Table 2.3). Climatic conditions can be directly measured under controlled conditions. Controlled experiments evaluate the combined effects of different climatic changes, as for example the effect of water stress induced by deficit irrigation under elevated temperatures created with open top chambers (Torres et al., 2017; Bonada et al., 2018). Experiments that reproduce elevated CO₂ conditions remain rare and limited to climate change impact studies without the introduction of an adaptation (Bindi et al., 2001; Wohlfahrt et al., 2018).

Table 2.3 Number of studies that describe future climate according to meteorological data, climate model or stakeholders' perception. The 18 review articles are excluded.

Climate data sources	Number of articles
Unspecified	27
Meteorological Data	35
Climate modeling	16
Perception	12
Meteorological + Perception	1
Climate modeling + Perception	2

Second, climate models (16 studies, Table 2.3) provide long and complete series of daily variations of a wide range of meteorological variables (CO₂, temperature, rainfall, etc.) for the past and next centuries. Ongoing advances in modeling allow global climate models (GCM's) to be downscaled to regional climate models (RCM's) and their microclimatic versions (Quénol et al., 2017). However, the use of several models is still recommended to account for their intrinsic uncertainties. While changes in average daily climate parameters such as temperature or rainfall could be described by climate models, this approach still hardly represents extreme weather events and sub-daily variations (e.g. extreme temperature, heavy rains).

Third, stakeholders' perceptions and experiences are the basis of 12 studies (Table 2.3) to describe future climatic conditions. Future climatic conditions are the result of elicitation exercises which may be individual (Nicholas and Durham, 2012; Neethling et al., 2017; Bardsley et al., 2018) or collective (Lereboullet et al., 2013b; Galbreath, 2014). They have the advantage of being locally adapted and of representing extreme events with their consequences. However, climate change may tend to be underestimated as the disruptive climatic conditions and new combinations of stresses, which may go far beyond local experiences, are hard to explore.

In a quarter of the selected studies, the climate evolution was not clearly specified (Table 2.3). The use of climate projection datasets is the only credible tool available for simulating the physical processes that determine climate change (Carter, 1996). However, it does not necessarily represent all the events proposed by stakeholders, notably those highlighted by Bardsley et al. (2018): extreme events (heat waves and heavy storms) and changes in natural resources (rainfall during the growing season and volumes of groundwater recharge). Data sources for future climatic conditions are poorly hybridized, despite the complementarity they offer. In our dataset, a single study coupled past evolution of meteorological data with winegrowers' perceptions (Lereboullet et al., 2013b). Similarly, only two studies (Table 2.3) combined climate modeling at local scale with stakeholders' perceptions (Sacchelli et al., 2017; Tissot et al., 2017).

4.2 Approaches to evaluate adaptation effects

Figure 2.6 illustrates the approaches used in our pool of articles to evaluate each category of adaptation. The number of studies that employed experimental and expert assessments is similar (34 and 35 respectively), whereas modeling approaches concern 21 studies. We did not find studies that used a combination of two approaches to evaluate an adaptation. It is noteworthy that all the adaptations were evaluated by experts, and that a few of them were also evaluated by modeling or experimental approaches (harvest management, farm strategy). By contrast, some specific adaptations (not detailed in the figure), such as biochar application and protective compound, were studied through experimentation only, and have never been reported by other types of study.

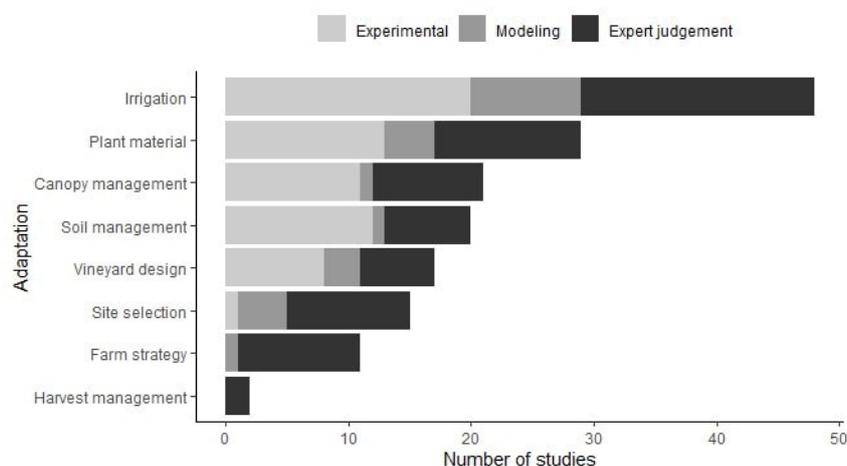


Figure 2.6 Number of studies (review articles excluded) that evaluate adaptation according to the implemented approach (experimentation, modeling, expert judgement). One study can appear several times, as it may evaluate several adaptations. We have not found any studies that combine two methods.

Experimental approaches have been widely used to understand vines' responses to changes in climatic conditions. Controlled conditions allow for the study of processes when one or several environmental factors are changed: CO₂ enrichment (Bindi et al., 2001), experimental drought (Medrano et al., 2003; Şerdinescu et al., 2014; Vaz et al., 2016; Cirigliano et al., 2017; Chrysargyris et al., 2018), or elevated temperatures (Bonada et al., 2018). The conditions of experimentation largely differ: from greenhouse conditions with fruit-bearing cutting under totally controlled conditions (Torres et al., 2017), to less controlled field experiments. Even if combinations of climatic factors are starting to be studied at plant scale, it is clearly difficult to extrapolate results at larger scales (e.g. field, region). The interactions between soil, climate and cultural practices are difficult to identify fully. Moreover, the conditions of field experiments may not accurately reflect

the overall production system constraints (vine age, cash flow, labor availability, water availability, etc.).

Unlike the experimental approach, which produces knowledge about the impact of environmental variables on a few processes only, models try to integrate that knowledge in order to predict the combined effects of climate change on the whole plant. Several approaches have been developed: empirical models, process-based models, suitability mapping, agent-based models, etc. We will not detail all existing models as they have been amply illustrated in a recent review by Moriondo et al. (2015). The aim of this section is to describe the types of models that are mostly used and how they are applied to evaluate combined adaptations.

Suitability mapping has been used in four studies of our dataset, mainly to evaluate site selection and irrigation adaptations (Hannah et al., 2013; de C. Teixeira et al., 2014; Fuhrer et al., 2014; Resco et al., 2016).

Empirical models have been used in one study to evaluate the effect of various cases of irrigation management under future climate change (de C. Teixeira et al., 2014; Olen et al., 2016). However, empirical models show their limits when evaluating an adaptation under alternative management conditions and future climatic conditions on which experiments have not yet been run.

Process-based models have also been used in 8 studies to evaluate adaptations dealing with irrigation (Grantham et al., 2010; Pieri et al., 2012; Fraga et al., 2018; Phogat et al., 2018), plant material (Pieri et al., 2012; Zhu et al., 2016), planting density (Van Leeuwen et al., 2019), site selection (Carvalho-Santos et al., 2016; Zhu et al., 2016) and mulching (Fraga and Santos, 2018). The development of models is limited by controversial effects of climate change on various processes, such as the effect of CO₂ on stomatal conductance. In addition, they poorly represent the perennial aspect of grapevines, as the multi-year succession of stresses and the age of the vine are not considered.

The first actors of adaptation are the decisions makers (policy makers and wine-growers). Yet both experimental and modeling approaches have rapidly derived into *top-down* approaches, moving from global climate model scenarios to impact studies, and then to assessments of adaptation. Hence, methodologies based on expert judgement have been implemented, resulting in qualitative or semi-quantitative results. Quantitative studies are mostly based on the dissemination of questionnaires in the vine industry. They allow for comparison of climate change adaptation under various macro-climatic conditions (Battaglini et al., 2009), and identify trade-offs, opportunities and hurdles. Qualitative studies are more diverse (socio ecological studies, regional risk assessments, semi-structured interviews, etc.). These approaches deal with multiple scales and multiple

adaptations, and consider a multitude of external factors. Two studies employed agent-based models to develop decision support systems that combine dynamic models with expert judgements (Delay et al., 2015; Tissot et al., 2017). These agent-based models are considered to be particularly appropriate tools for simulating complex interactions between ecological and social components (Tissot et al., 2017).

4.3 Evaluation scales and criteria

Among the selected articles, 33 studied plant scale, 32 studied field scale, 14 studied regional scale, and 14 studied farm scale (Figure 2.7). Most of them focused on one scale, and only 17 studies considered two or more scales simultaneously. It is noteworthy that 5 out of those 17 studies applied the expert judgement methodology (Battaglini et al., 2009; Lereboullet et al., 2013b; Neethling et al., 2017; Tissot et al., 2017; Bardsley et al., 2018). Upscaling can be seen as “abrupt” in some studies (e.g. Hannah et al. 2013; Fraga et al. 2018). For example, moving from field to regional scale without considering the intermediary farm scale, implies that the constraints and opportunities of the farming system are not considered (farm delimitation, wine-making processes and sales, labor availability, etc.). In the same way, the scaling-up between plant and regional scale overlooks agronomic practices than can influence the performance of an adaptation.

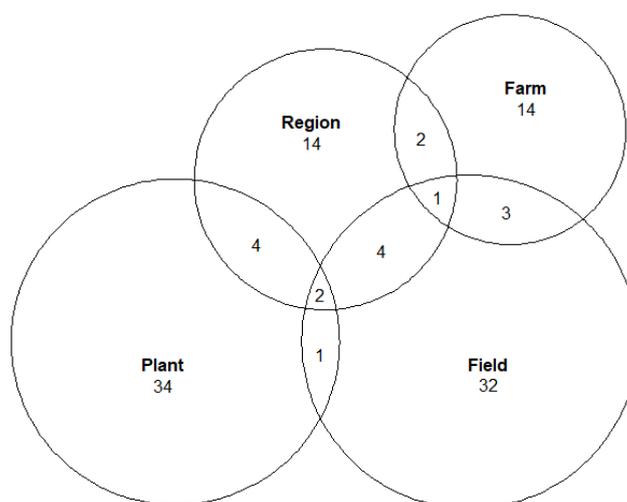


Figure 2.7 Number of studies that address one or more spatial scales in the pool of articles (n=111).

Figure 2.8 indicates the number of studies that quantified one or several indicators for each adaptation. We see a large number of indicators at plant and field scales, whereas farm and regional scales are studied less. Yield, berry composition and water status were the most studied indicators (31, 30, and 31 studies, respectively). Seven studies

addressed regional scale in a quantitative way (reference in Appendix B) and concern mainly irrigation and site selection adaptation. The lack of multi-year processes at plant and field scale is noteworthy (for example, the mortality rate).

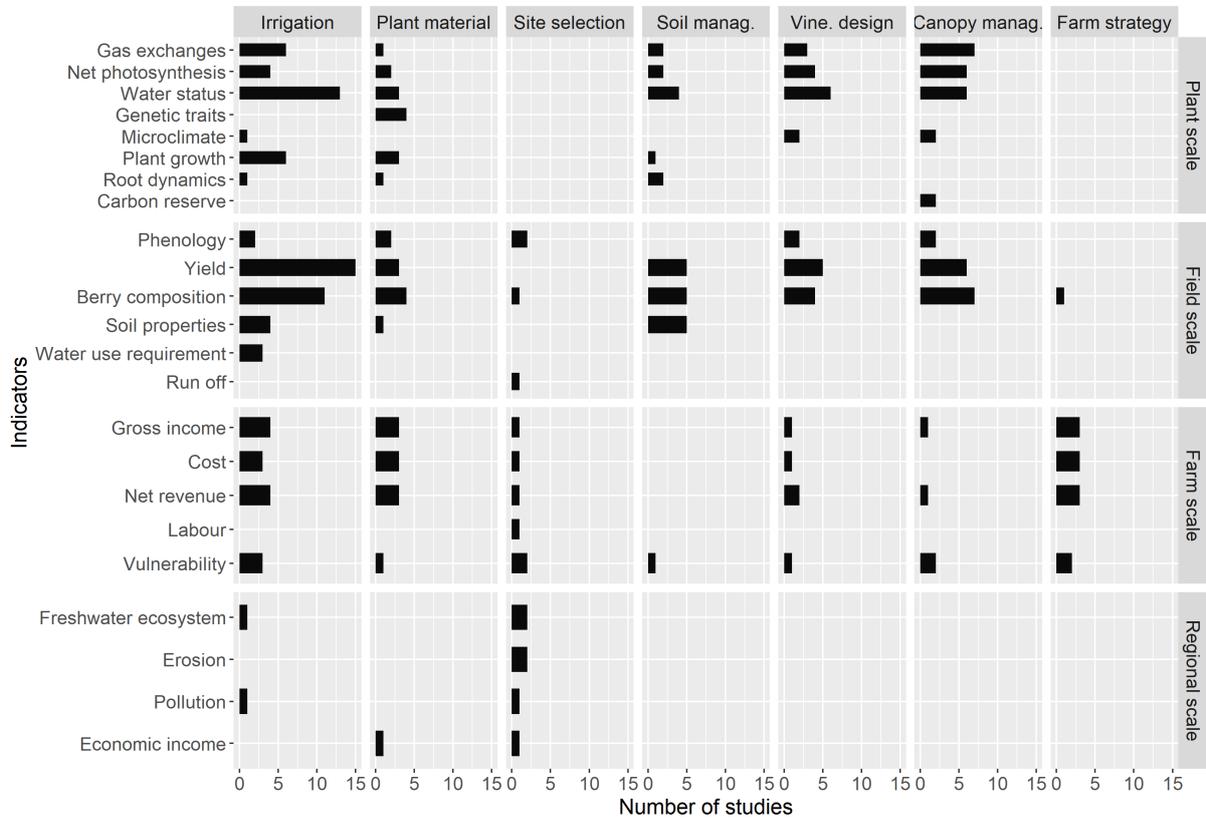


Figure 2.8 Number of studies that evaluate adaptation according to their evaluation indicators, from plant scale to field, farm and regional scale (from top to bottom). Only quantitative evaluations of adaptation are included (60 studies). Detailed table and references in Appendix B - Supplementary Table 3.

5 Discussion

5.1 Identifying the site-specific trade-off between adaptations

Most potential adaptations to water scarcity under future climate change have been evaluated individually. Our review suggests that the few existing studies dealing with combinations of adaptations help in identifying several compromises between these adaptations: the reduction of irrigation requirement through water-saving practices (Cirigliano et al., 2017; Chrysargyris et al., 2018; Gil et al., 2018; Romero et al., 2018; Torres et al., 2018); the benefits of cover crops despite water competition (Tomaz et al., 2017); the conservation of vineyard areas thanks to cultivar changes and new governance modalities

(Galbreath, 2014; Delay et al., 2015; Zhu et al., 2016; Morales-Castilla et al., 2020); and the role of socio-economic conditions in promoting or regulating adaptations (Olen et al., 2016; Georgopoulou et al., 2017). It is noteworthy that since the systematic review ended, new developments have been published: Buesa et al. (2020) confirm the positive effects of east-west row orientation on yields; Morales-Castilla et al. (2020) quantified the reduction of suitable area lost thanks to late-ripening cultivar (from 56 to 24%); Phogat et al. (2020) went further in the estimation of future irrigation water requirement and demonstrate the importance of reducing evaporation loss ; while López-Urrea et al. (2020) quantified the effect of organic and plastic mulch on evaporation. Our findings are in accordance with the climate adaptation wedges concept developed by Diffenbaugh et al. (2011). These authors illustrate the benefits of adding two adaptation strategies in limiting adverse effects of climate change in a changing context (population, development, etc.). For instance, the yield loss prevented by an adapted cultivar could be even greater when combined with an appropriate irrigation treatment.

In fact, many of the identified trade-offs occur at nested temporal and spatial resolutions (e.g. short-term vs. long-term effects of cover crop, irrigation practices vs. regional water availability, planting choice vs. local or national governance) that have hardly been captured by previous evaluation studies. With regard to time scale, the spatial expansion of long-term adaptation (e.g. cultivars, planting density) is limited by the vineyard renewal, which is estimated at around 2 to 3% in France (Agreste, 2018), whereas the adoption of short-term adaptations depends on the infra-annual organization of farm labor. Moreover, climatic changes could be described at a century scale (global warming) when dramatic events may occur at the scale of a few hours or days (heavy rain, heat waves). With regard to spatial scale, the close link between viticulture and *terroir* means that a wide range of spatial factors must be considered – soil, microclimate, and socio-economic – when designing and evaluating adaptation strategies.

The design and implementation of effective combinations of adaptations require a quantification of the possible impacts of climate change, coupled with the sensitivity of those impacts to different adaptation activities (Diffenbaugh et al., 2011). Models may play a central role in managing various time steps and spatial units. Previous works dealing with adaptation have developed modeling tools with the aim of integrating climate projection into grapevine crop models (Moriondo et al., 2015). Models exist for some specific processes: WaLIS for water balance (Celette et al., 2010), VitiSim for carbon balance (Mirás-Avalos et al., 2018), NVINE for nitrogen cycle (Nendel and Kersebaum, 2004), STICS for yield (Fraga et al., 2018), among others. The few studies that integrated decision-making into their models are based on agent-based modeling (Delay et al., 2015;

Tissot et al., 2017). Other decision models developed in viticulture could be adapted to climate change studies: VERDI (Ripoche et al., 2011), or DHIVINE (Martin-Clouaire et al., 2016). However, Corbeels et al. (2018) recently challenged the ability of crop models driven by climate model projections to identify promising adaptation, given the large uncertainties of model predictions.

In addition, the contribution of stakeholders is important in characterizing and considering local constraints and opportunities. The example of co-design and evaluation studies oriented towards the reduction of pesticide use offers promising tools (Lafond and Métral, 2015; Thiollet-Scholtus and Bockstaller, 2015). In fact, strategies of adaptation to climate change with the participation of stakeholders have already been evaluated (Battaglini et al., 2009; Nicholas and Durham, 2012; Alonso and Liu, 2013; Lereboullet et al., 2013b). However, the quantitative evaluation or comparison of co-designed strategies under future climatic conditions has not yet been developed. Further researches need to be conducted in order to combine the co-design of spatial adaptation strategies with their quantitative evaluation under future climatic conditions.

5.2 Insight for developing a new evaluation framework

Based on the lessons learnt from reforestation studies (Cunningham et al., 2015), we propose a new framework of adaptation evaluation in four steps, considering different time and space scales, with a few to building spatially explicit strategies (Figure 2.9). A first step concerns the integration of three temporal scales (year, decade, century). A second step integrates spatial factors into the evaluation processes (water access, Protected Denomination of Origin areas, microclimate, etc.). A third step explores the spatialized adaptation strategies, considering a combination of adaptation in both time and space. A fourth step allows trade-offs to be identified by calculating multiple evaluation indicators over time.

The first step in evaluating local adaptation strategies may help researchers in considering the impact of climate change and of adaptation strategies over relevant times scales (year to century) (Figure 2.9a). Adequate models exist but they are far from being exhaustive (e.g. high temperature, CO₂ effects) and parameterized for various contexts (soil, climate, cultivar, etc.) (Moriondo et al., 2015). The existing models could be improved by conducting more focused research (experimental or on-farm), particularly in traditional grapevine systems (low density, traditional cultivars and crop management). Other improvements lie in considering multi-year processes (e.g. mortality). Given the urgency of adaptation, expert opinion might also be used to develop and parameterize models when quantitative knowledge is unavailable. Close collaboration between

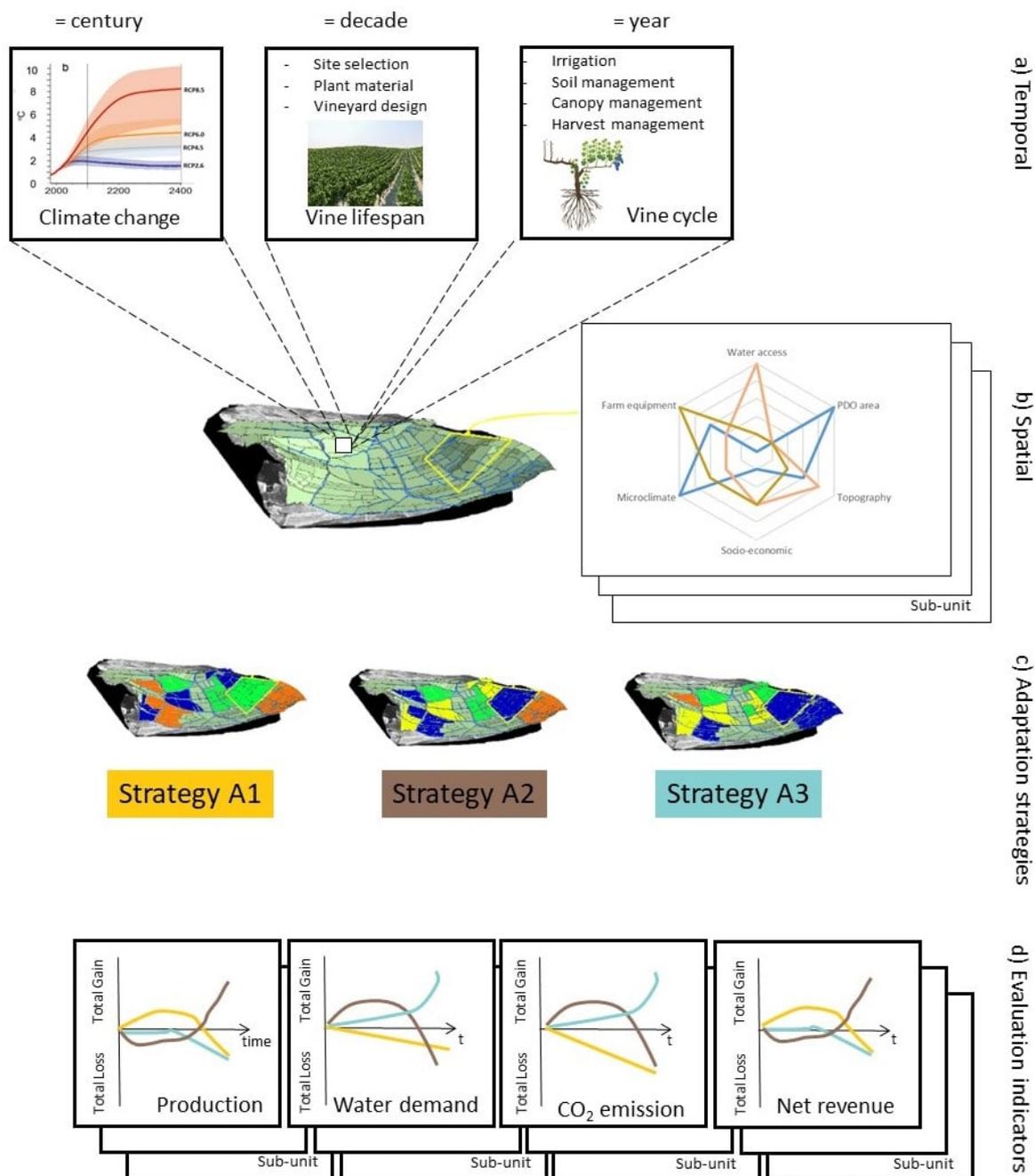


Figure 2.9 Conceptual diagram of the spatio-temporal model needed to design and evaluate strategies for adaptation to climate change across viticultural regions: (a) temporal scale integration and associated adaptation levels; (b) spatial factors; (c) exploration of adaptation strategies; and (d) calculation of evaluation indicators. In yellow, blue and brown, three adaptation strategies that consist of three different spatial combinations of adaptation levels (in green, orange and dark blue).

researchers and winegrowers might help in designing better adaptation trials in order to fill knowledge gaps.

The second step consists in delimiting spatial sub-units that represent regions where the conditions of adaptation to climate change can be expected to be similar. The collection of data to parameterize models in each spatial sub-unit is laborious. The relevancy of required data (e.g. slope, soil type, water access, “Protected Designation of Origin” area) could be discussed with experts or local stakeholders. To go further, models should be scaled up to larger sub-units (farm, small agricultural region, catchment, country, etc.) (Figure 2.9b). This scaling up process requires spatial and temporal modeling methods that predict the aggregated effects of adaptation.

The third step, the integration of a detailed understanding of the plant and field processes with regional-scale modeling is a key towards predicting the effects of the spatial distribution of adaptation levers while considering biophysical and socio-economic diversity. The use of large-scale spatial and temporal models makes possible the exploration of a large range of plausible adaptation strategies, including future climate evolution (e.g. more frequent droughts, higher temperatures), economic choices (e.g. expansion of PDO areas, marketing labels, water prices) and social changes (e.g. consumer preferences) (Figure 2.9c).

In the final step, such models may be used to quantify a large range of evaluation indicators (environmental, economic, agronomic, etc.) in order to reveal trade-offs and avoid potential deleterious adaptation strategies (e.g. unbalanced water demand and supply, yield reduction, climate change mitigation) (Figure 2.9d). Evaluation indicators should be calculated across time as a beneficial strategy could appear as a mal-adaptation under future climatic conditions or, on the contrary, an apparently disadvantageous strategy could appear beneficial in the near future. The development of indicators should meet the objectives of various local stakeholders (wine-growers, policy-makers, environmental defenders, etc.).

In conclusion, rigorous evaluation of adaptation strategies for climate change helps to identify site-specific adaptation trade-offs. We argue that the development of methodologies to evaluate adaptation strategies, considering both complementary adaptations and scales, is essential to propose relevant information to decision-makers in the wine-growing sector. The development of spatial and temporal evaluation tools based on mixed knowledge – local and scientific – about grapevine response to climatic conditions, is a key for deciding how to locally adapt viticulture to climate change.

PARTIE II

Matériel et Méthodes

Chapitre 3

Cas d'étude et démarche

Ce chapitre expose les choix méthodologiques qui ont guidé ce travail de thèse. Ces choix sont repris et complétés dans les chapitres de résultats (Chapitres 4 et 5) présentés sous forme d'articles.

Ce chapitre est organisé en deux parties. La première partie présente le cas d'étude : le bassin versant du Rieutort. J'y détaille les raisons du choix de ce bassin, ses caractéristiques paysagères et climatiques, ainsi que les acteurs locaux et régionaux qui ont pris part à notre démarche. La deuxième partie expose la démarche de modélisation participative qui a été mise en œuvre. Cette démarche consiste en l'articulation de cinq ateliers collectifs, entrecoupés de phases de modélisation. Chacune des trois étapes qui la constituent (construction du modèle, test du modèle, simulations) fait appel à la participation des acteurs. Les objectifs et le déroulement de chaque étape sont détaillés dans ce chapitre.

1 Cas d'étude : le bassin versant du Rieutort

1.1 Un bassin versant caractéristique du vignoble languedocien

Le vignoble languedocien est le 2^{ème} vignoble de France par sa surface (228 000 ha) et le 1^{er} en production (FranceAgriMer and CNIV, 2016). Le vignoble de l'Hérault est caractéristique des vignobles de la façade méditerranéenne. Les reliefs marqués par le massif des Cévennes au nord (1000 m d'alt.) descendent en collines et coteaux jusqu'à la plaine littorale (Figure 3.1A). Ce gradient topographique marque également un gradient climatique. Sur la période 1971-2000, le cumul annuel de pluviométrie varie entre 400 mm dans la plaine et 800 mm sur les reliefs des différents secteurs viticoles (Figure 3.1B). Les caractéristiques pédologiques du vignoble suivent également ce gradient depuis les sols minéraux sur les contreforts des Cévennes, vers des sols argilo-calcaires intermédiaires, et les sols alluvionnaires de la plaine littorale et des bas-fonds (Figure 3.1C).

Dans le département de l'Hérault, la vigne couvre 45% des surfaces cultivées, soit 83 400 ha. On dénombre 13 aires d'appellations, dont la plupart marquent la limite nord du vignoble héraultais (Figure 3.1D). La production viticole se partage entre 76% du volume en Indication Géographique Protégée (IGP), 12,5% en Appellation d'Origine Protégée (AOP) et 11,5% en Vin Sans Indication Géographique (VSIG) (Agreste, 2021). Les rendements en 2019 étaient de 58 hl/ha en moyenne, mais présentent une forte variabilité entre des rendements moyens de 34 hl/ha en AOP contre 97 hl/ha en VSIG (Agreste, 2021). 16% des surfaces viticoles sont irriguées, avec pour objectif d'irriguer jusqu'à 30% du vignoble d'ici 2030 (Département Hérault, 2019).

Le cas d'étude choisi dans cette thèse est délimité par une unité hydrologique, le bassin versant, qui permet de s'intéresser plus particulièrement à la gestion d'une ressource en eau de moins en moins disponible. Cette délimitation physique facilite l'étude des flux d'eau dans le paysage et permet de se placer à l'interface de divers territoires¹. Le premier critère de choix du domaine d'étude est de représenter la diversité viticole présentée en Figure 3.1 (viticulture de coteaux/de plaine, production AOP/IGP, irriguée/non irriguée, etc.). Le deuxième critère de choix est lié à la modélisation. La dimension du bassin d'étude est limitée par notre capacité à obtenir des données de qualité sur l'ensemble du bassin d'étude pour caler un modèle numérique. C'est pourquoi un bassin dont certaines données sont déjà disponibles montre un avantage. Enfin, le troisième critère de choix est lié à l'approche participative que l'on souhaite mettre en place : une importance est donnée à la présence actuelle d'une dynamique entre les acteurs.

¹Au sens d' « espace identifié et différencié par les activités humaines dont il est le siège, et par les groupes sociaux qui y interagissent » (Boiffin, 2004)

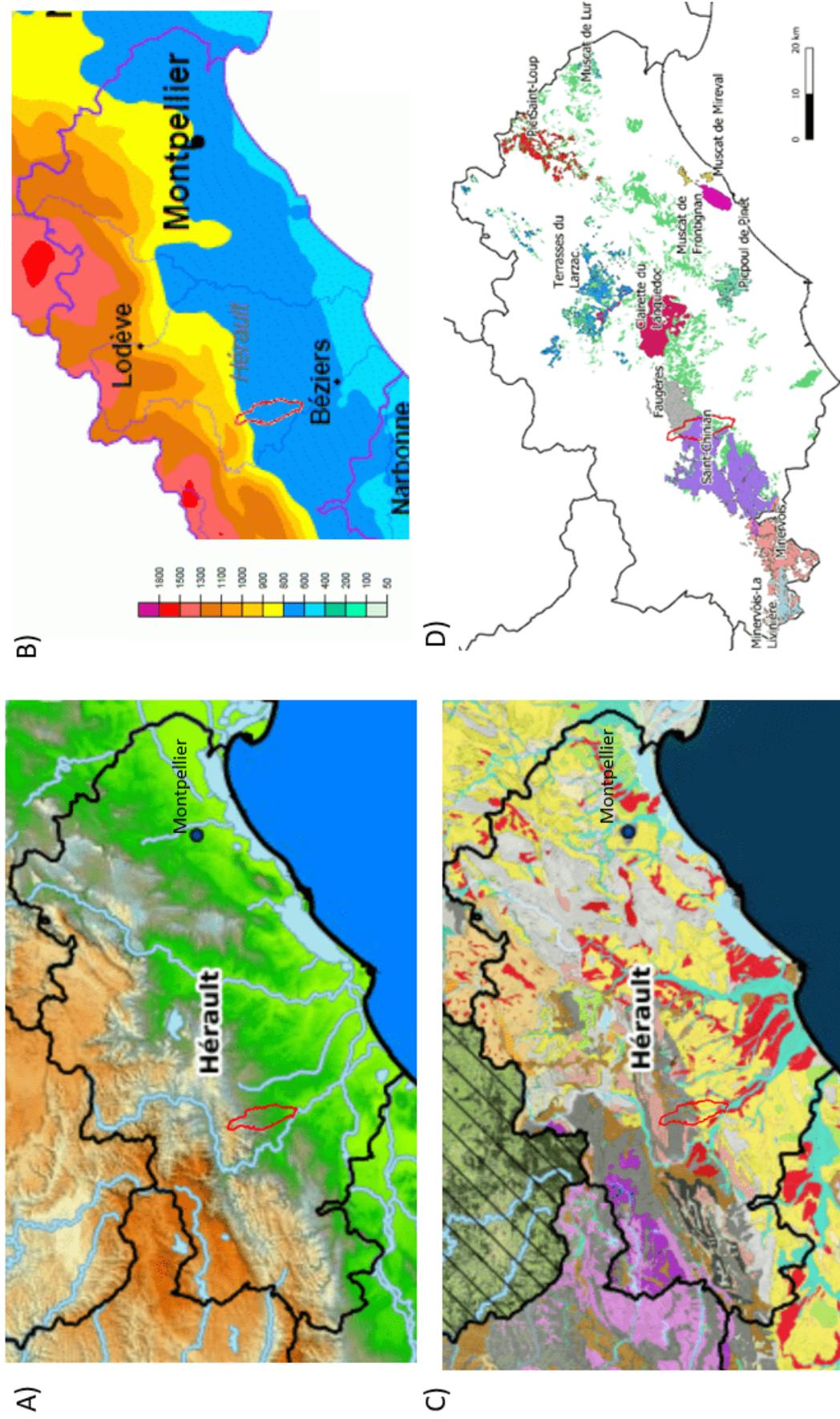


Figure 3.1 Caractéristiques du vignoble héraultais. A) relief et hydrographie (source : IGN, BD-Topo), B) normale annuelle des précipitations - période 1971-2000 (ADEME and Météo France, 2011), C) types de sol (en bleu/vert les sols alluviaux, en rouge/violet les sols évolués, en jaune les sols issus de matériaux calcaires, en gris les sols minéraux) (source : GIS-Sol) et D) aires d'appellation (source : INAO). En rouge, le bassin versant du Rieutort.

Le bassin versant du Rieutort (45 km²), affluent de l'Orb ry situé à 15 km au nord de Béziers, satisfait nos trois critères de sélection. Le vignoble, d'une surface de 1500 ha, couvre 80% des surfaces cultivées (RPG, 2017) et concerne 136 exploitations agricoles (com. pers. N. Van Hanja, EPTB Orb and Libron). Ce vignoble se situe à l'interface entre la plaine biterroise au sud et les coteaux des AOP Saint Chinian et Faugères au nord (Figure 3.1A, D). Un réseau d'irrigation géré par BRL² permet l'irrigation de la zone sud du bassin depuis une station de pompage dans l'Orb. De plus, le bassin versant du Rieutort fait partie d'une aire d'alimentation de captage prioritaire « Grenelle »³ depuis 2011. Ce dispositif assure la présence d'un(e) animateur(trice) de bassin qui est en charge de l'animation agro-environnementale dans la zone, ce qui présuppose une dynamique de longue durée dans la zone. Enfin, ce bassin a déjà fait l'objet d'un projet mené par INRAE (projet SP3A – 2012-2015) dont l'objectif était d'identifier et d'évaluer les pratiques et leurs répartitions spatiales permettant de réduire la contamination des eaux par les herbicides (Andrieux et al., 2015). Au cours de ce projet, des données sur les sols, le réseau hydrographique, l'occupation du sol, le réseau d'acteurs, les exploitations viticoles et les pratiques ont été collectées et ont pu être remobilisées.

1.2 Description des paysages

Les paysages du bassin versant du Rieutort peuvent être décrits selon trois ensembles pédo-morphologiques : en amont une zone de reliefs que l'on appellera « coteaux » par la suite (200 à 600 m d'alt.), au centre une zone de « collines et vallons » (80-200 m d'alt.), en aval une zone de « plaine » (20 – 80 m d'alt.) (Figure 3.2). Ces trois zones ont été caractérisées à partir de la carte des sols au 1/100 000 de la feuille de Lodève (Bonfils, 1993). Les coteaux sont peu cultivés et majoritairement couverts de garrigues et de forêts. On y retrouve un système pédologique sur schistes, aux sols généralement superficiels et très caillouteux.

La zone vallonnée présente une alternance de parcelles de vignes et de bosquets. Deux systèmes pédologiques sont présents dans cette zone : l'un sur formations de l'Eocène, l'autre sur formations miocènes. Cet ensemble complexe de sols majoritairement argilo-calcaires peut être décomposé en plusieurs sous-unités morphologiques selon les zones d'affleurements aux sols peu ou moyennement profonds, et les zones de dépressions aux sols plus profonds.

²Compagnie d'aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc

³Dispositif mis en place dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau pour les aires d'alimentation des captages présentant un enjeu particulier pour l'approvisionnement quantitatif et qualitatif en eau potable

La plaine est dominée par la vigne mais on y trouve plusieurs parcelles d'autres cultures (blé dur, orge, tournesol). Elle est constituée d'un système pédologique sur alluvions anciennes et récentes de l'Orb. Les dépôts anciens de l'Orb forment des « terrasses » où se trouvent des sols appauvris calciques, rougeâtres, caillouteux en surface. En aval, les dépôts récents de l'Orb forment des sols peu évolués, très profonds et peu caillouteux. Une nappe d'eau à faible profondeur est présente dans la partie aval de cette plaine alluviale.

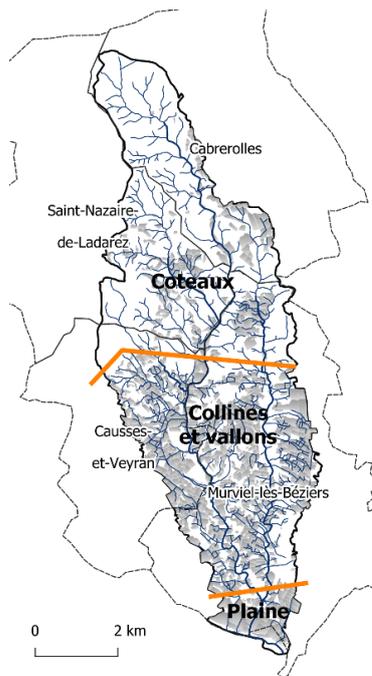


Figure 3.2 Délimitation des trois zones du bassin versant du Rieutort. En trait pointillé, les limites des communes, en trait continu, le bassin versant. En bleu le réseau hydrographique (cours d'eau et fossés). Les parcelles de vignes sont en gris (source : orthophotographie 2010, complétée par le RPG 2017)

Le parcellaire du bassin versant est très morcelé, avec une taille moyenne des parcelles viticoles de 0,87 ha (RPG, 2017). Le réseau hydrographique naturel et anthropique (fossés) est dense (58 m de fossé par ha) afin de favoriser l'évacuation de l'eau ruisselée sur les parcelles lors des événements de pluies intenses (épisodes méditerranéens) (Andrieux et al., 2015). En hiver, un enherbement spontané est visible sur l'ensemble des parcelles de vigne. Dès le printemps, cet enherbement n'est maintenu que sur quelques parcelles, en général un inter-rang sur quatre.

20% du vignoble est situé dans la zone de plaine. Les parcelles sont plus grandes (>1 ha en moyenne) et planes. Les vignes y sont palissées et majoritairement irriguées avec des systèmes de goutte-à-goutte (Figure 3.3A). Les vignes sont palissées, le plus généralement en cordon de Royat ou en Guyot. Quelques parcelles sont conduites en taille rase mécanique, aussi appelée « taille en haie ».

60% du vignoble se situe dans la zone centrale. Les parcelles sont souvent organisées sous forme de « terrassettes » pour lutter contre l'érosion (Figure 3.3B). Comme dans la plaine, les vignes sont palissées, en cordon de Royat ou en Guyot.

20% du vignoble se situe dans les coteaux. Les parcelles sont regroupées en îlots entourés de forêts. La vigne est le plus souvent localisée sur les versants exposés au sud. Un ensemble de parcelles sur la commune de St Nazaire de Ladarez est implanté en courbes de niveau pour limiter l'érosion, particulièrement importante dans cette zone. Plusieurs parcelles sont conduites en gobelets, et donc non palissées et non mécanisées (Figure 3.3C), tandis que les autres sont palissées en cordon de Royat ou en Guyot. On y trouve également plusieurs traces de vignes abandonnées.



Figure 3.3 Trois systèmes viticoles du Rieutort A) système palissé irrigué de la plaine, B) système palissé pluvial sur la zone argilo-calcaire, C) système en gobelet des coteaux

1.3 Description du climat

La zone d'étude est soumise à un climat méditerranéen avec pour caractéristiques des automnes pluvieux marqués par des événements à forte intensité, des étés chauds et secs, et une forte variabilité interannuelle des pluies. La pluviométrie annuelle moyenne, enregistrée à la station de Météo France de Murviel-les-Béziers sur la période 2000–2019, est de 625 mm avec un minimum à 396 mm, un maximum à 1135 mm et un écart type de 160 mm. La température moyenne annuelle est de 15,2°C et l'évapotranspiration de référence calculée par la méthode de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) est de 1170 mm. Il existe une variabilité spatiale du climat au sein du bassin du Rieutort (Figure 3.4). La comparaison des données issues des stations météorologiques autour du bassin montre un gradient de l'ordre de 125 mm entre Puisserguier au sud et Faugères au nord du bassin. Il existe également un écart de l'ordre de 1,3°C entre les températures moyennes annuelles, sans pouvoir le relier de manière simple à la position ou à l'altitude des stations. Les données de projections climatiques à l'horizon 2100 qui sont présentées en Section 2.4.1 sont fournies pour les six mailles SAFRAN⁴ qui couvrent le bassin (Figure 3.4), afin de prendre en compte cette variabilité.

⁴Grille de calcul régulière (8 x 8 km) sur laquelle sont interpolés les paramètres climatiques calculés par les modèles de prévision ou de projection climatiques.

les conseillers locaux de la chambre d'agriculture n'ont rejoint le processus que plus tard. Les viticulteurs, directement impactés et premiers détenteurs des leviers d'adaptation techniques, font aussi partie de la démarche. Leurs contacts ont été communiqués par les trois organisations citées plus haut, avec pour critères de couvrir la diversité des systèmes de production du bassin. Au total, j'ai rencontré huit viticulteurs(trices), dont trois en cave coopérative, cinq en cave particulière, aux types de productions variées (deux membres de l'AOP Faugères, deux membres de l'AOP St Chinian), avec des labellisations différentes (trois en agriculture biologique, un en Terra Vitis et quatre en HVE⁵) et un irriguant.

Il m'aît paru important d'impliquer des acteurs régionaux dans la démarche car ils sont porteurs d'autres connaissances et perceptions permettant de replacer le contexte du bassin versant du Rieutort dans une dynamique régionale. Sept acteurs régionaux ont été rencontrés dont (i) des structures administratives qui peuvent, à travers les directives ou des financements, contraindre ou encourager les pratiques agricoles (agence de l'eau, conseil départemental), (ii) les organismes d'appui et de services à la viticulture, porteurs de conseils sur la gestion technique de la vigne (chambre d'agriculture, Institut Français de la Vigne et du Vin (IFV), Institut Coopératif du Vin (ICV)), et (iii) le syndicat de l'appellation Languedoc. Certains d'entre eux, particulièrement intéressés, ont participé à la suite de la démarche collective (voir plus de détails dans le Chapitre 4).

2 Positionnement de la démarche générale

2.1 Présentation de la démarche générale

La démarche mise en place au cours de cette thèse s'est construite progressivement, avec pour idée de maintenir une flexibilité et une possibilité d'itération pour appréhender la complexité du système (Voinov, 2008). Elle se base cependant sur quelques choix initiaux en termes d'objectifs de modélisation et de participation (Figure 1.8). Concernant la modélisation, il existe déjà plusieurs modèles en viticulture pour quantifier les impacts du changement climatique (Moriondo et al., 2015). L'objectif est de valoriser cette ressource existante, en l'adaptant aux problématiques exprimées par les acteurs. La construction d'un modèle de simulation, basé autant que possible sur le couplage de modèles existants, est donc l'un des objectifs de la démarche. Concernant la participation, les acteurs sont mobilisés pour (i) aider à choisir les composantes du modèle, (ii) renseigner les données d'entrées du modèle, (iii) proposer des stratégies d'adaptation, et (iv) discuter les sorties du modèle en situations actuelle et futures. L'objectif de la démarche est donc avant tout

⁵Label « Haute Valeur Environnementale »

une exploration des enjeux par les acteurs. Cette démarche originale s'inspire dans sa mise en œuvre de précédents travaux combinant la participation des acteurs avec l'utilisation de modèles quantitatifs (Delmotte et al., 2016; Leenhardt et al., 2012; Voinov et al., 2018).

Dans le cadre de cette étude, nous proposons un processus de modélisation en trois étapes classiques, en intégrant à chaque étape la participation des acteurs du bassin d'étude (Figure 3.5). 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 (Section 2.2). La deuxième étape est la phase de test du modèle. 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) (Section 2.3). Une fois la situation de référence évaluée comme fiable 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 (Section 2.4).

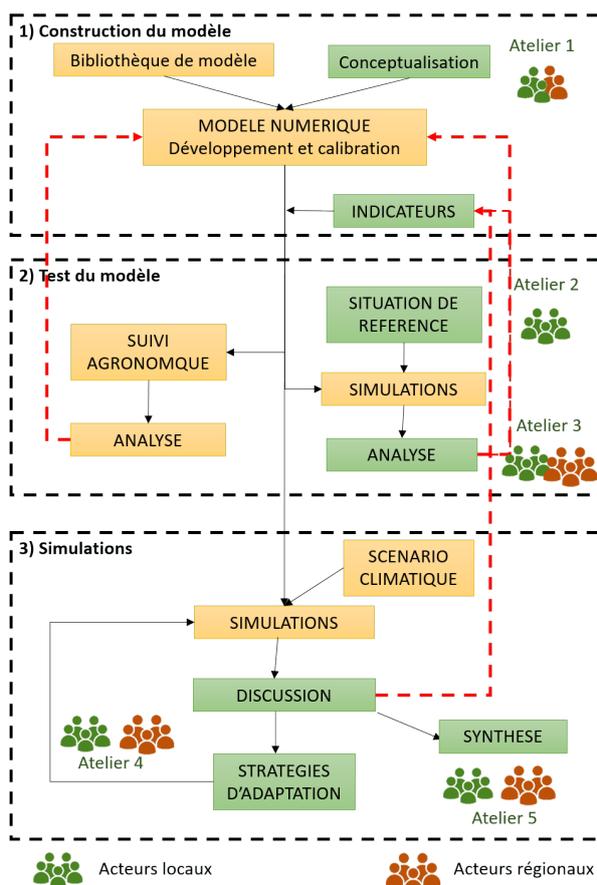


Figure 3.5 Schéma général de la méthode. Dans les cases vertes, les activités menées avec les acteurs ; dans les cases oranges, les activités menées par les chercheurs. Les flèches rouges indiquent les retours effectués vers le développement du modèle au cours de l'étude.

En pratique, la démarche s'est organisée autour de cinq ateliers collectifs, entrecoupés de phases de modélisation (Figure 3.5). Parmi les cinq ateliers organisés, les trois derniers ont été réalisés avec deux groupes différents. Les acteurs locaux et les acteurs régionaux

ont été réunis séparément afin de satisfaire à la fois des intérêts de discussion communs, de favoriser la participation en proposant deux lieux d'ateliers (Montpellier et Murviel-Béziers), et de respecter les conditions sanitaires liées à la pandémie de COVID-19.

2.2 Construction du modèle

2.2.1 Elaboration d'un schéma conceptuel

La phase de conceptualisation avec les acteurs, en amont de la programmation numérique du modèle avait pour objectifs : (i) d'échanger des perceptions et des connaissances autour de l'enjeu du changement climatique, (ii) d'introduire le concept de modélisation (structure, intérêts et limites), et (iii) de favoriser dans la suite du processus l'adéquation du modèle de simulation aux attentes des participants. Le résultat attendu de cette phase était un schéma conceptuel, qui reprenne l'ensemble des éléments à inclure dans le modèle numérique pour traiter de la question de l'adaptation au changement climatique dans le Rieutort.



Atelier de conceptualisation - juin 2019

Le premier atelier s'est déroulé sur une journée entière avec l'ensemble des acteurs (locaux et régionaux). Nous avons utilisé des outils de *brainstorming* (en groupe ou en plénière) pour organiser les discussions autour des différentes parties du modèle :

- Quels événements climatiques attribuez-vous au changement climatique ?
- Quels sont les impacts du changement climatique dans le bassin versant ?
- Quels sont les leviers d'adaptation envisagés ? A quelles échelles spatiales et temporelles ?
- Pour chaque levier, où et pourquoi sont-ils applicables ou non applicables ?

Le schéma conceptuel a été reconstitué sur la base des post-it, cartes annotées et notes prises pendant l'atelier. Les processus reliant les entrées du modèle (i.e. événements climatiques, leviers, contexte d'application) et sorties du modèle (i.e. variables impactées) ont été élicités par le modélisateur. Ce schéma a servi de base pour choisir les modules composant le modèle de simulation. Il a également servi de support de communication, par la suite, pour illustrer ce que le modèle prend en compte ou non.

2.2.2 Développement du modèle de simulation

La plateforme de modélisation de paysages OpenFLUID⁶ a été utilisée car elle permet :

- la représentation de paysages, constitués d'objets spatiaux avec des attributs associés et des connexions spatiales ;
- l'intégration de modules développés en langages C++, R et Fortran ;
- le couplage de modèles spatio-temporels, à différentes échelles ;
- des formats de données d'entrée et de sortie adaptables pour faciliter les pré et post-traitements.

Parmi l'ensemble des modèles disponibles (Tableau 3.1), trois critères de sélection ont été définis pour choisir ceux qui devaient composer le modèle de simulation. D'abord, le modèle doit répondre à des attentes exprimées par les acteurs au travers du schéma conceptuel construit au premier atelier. Puis, les données nécessaires à sa paramétrisation doivent être disponibles ou facilement accessibles. Enfin, il doit pouvoir être implémenté dans la plateforme de modélisation de paysages OpenFLUID.

Au total, le modèle de simulation développé dans cette thèse est composé de quatre modules couplés (i.e. sous-modèle) qui permettent de simuler les dynamiques spatio-temporelles (i) de l'eau (infiltration, évapotranspiration, ruissellement), et de (ii) la production viticole à l'échelle de la parcelle et du bassin versant, à pas de temps journalier. Trois modèles préexistants ont été sélectionnés pour simuler la phénologie (Morales-Castilla et al., 2020), le bilan hydrique (WaLIS, Celette et al. 2010), et décrire la connectivité entre entités spatiales (Lagacherie et al., 2010). Parmi eux, le modèle WaLIS a fait l'objet de plusieurs modifications pour mieux prendre en compte les pratiques de gestion du sol décrites par les acteurs du bassin. Ces modifications sont détaillées en Annexe C. Pour déterminer le rendement de la vigne, les modèles de culture mécanistes (ex. STICS (Garcia de Cortazar Atauri, 2006), Cropsyst (Stöckle et al., 2003)) sont apparus difficiles à paramétrer à l'échelle du bassin du Rieutort et ils ne considèrent que trop peu les leviers techniques proposés par les acteurs. Van Leeuwen et al. (2019) proposent d'estimer le rendement de manière empirique, en fonction de la disponibilité moyenne en eau dans le sol 30 jours avant la récolte dans la région de Bordeaux. Nous nous sommes inspirés de leur démarche pour développer un modèle simulant les différentes composantes du rendement, adapté à la région méditerranéenne, afin d'estimer le rendement de la vigne, à partir de l'indicateur de disponibilité en eau dans le sol calculé par WaLIS. Ce modèle, intitulé GraY (GRApe Yield), est présenté dans le chapitre 4.

⁶<https://www.openfluid-project.org/>

Tableau 3.1 Liste des modèles existants pour représenter les systèmes et paysages viticoles. Chaque modèle est évalué selon son intérêt vis-à-vis du schéma conceptuel de l'atelier 1 (SC), la disponibilité des données pour sa paramétrisation (données), et sa compatibilité avec OpenFLUID (logiciel). En gras, les modèles sélectionnés pour composer le modèle de simulation à l'échelle du bassin.

FTSW : fraction d'eau transpirable dans le sol ; SWEP : déficit hydrique « expérimenté » dans le sol ; GDD : Growing Degree Day.

Type	Nom	Sorties calculées	SC	Données	Logiciel	Référence
Phénologie	-	Débourrement Floraison Veraison	++	++	+	(Morales-Castilla et al., 2020)
	FENOVITIS	Débourrement Floraison Véraison	++	+	?	(Caffarra and Eccel, 2010)
	GDD	Floraison Veraison	-	++	+	
Bilan hydrique	WaLIS	FTSW Ruissellement	++	+	+	(Celette et al., 2010)
	BisWat	SWEP Ruissellement	++	-	++	(Bertrand et al., 2018)
Modèle de culture	STICS	Phénologie Biomasse Rendement Composition des baies	+	-	-	(Garcia de Cortazar Atauri, 2006)
	UNIFI.GrapeML	Phénologie Biomasse Rendement	+	-	?	(Bindi et al., 1997; Lelolini et al., 2018)
	CropSyst	Phénologie Biomasse Rendement	-	-	++	(Stöckle et al., 2003)
Rendement	-	Rendement	++	+	++	(Van Leeuwen et al., 2019)
	-	Nombre de grappes Nombre de baies	++	+	++	(Guilpart et al., 2014)
Décision	DHIVINE	Itinéraire technique	++	+	-	(Martin-Clouaire et al., 2016)
	SEVE	FTSW Itinéraire technique	++	+	-	(Tissot et al., 2017)
	-	Acidité vins Achat/vente de parcelles	-	?	-	(Delay et al., 2015)
Hydrologie	GeoMhydas	Connectivité hydrologique	+	-	++	(Lagacherie et al., 2010; Moussa et al., 2002)

2.3 Test du modèle

2.3.1 Construction de la situation de référence

L'atelier 2 avait pour objectif de construire la situation de référence avec les acteurs locaux, c'est-à-dire de recueillir l'ensemble des données d'entrée du modèle pour représenter la situation actuelle. La situation de référence représente les caractéristiques biophysiques et les pratiques culturelles, de manière spatialement explicite dans le bassin versant. L'enjeu était de trouver un compromis entre la qualité et la quantité (niveau de précision) des données d'entrée du modèle, au regard de leur disponibilité et de l'expertise mobilisable.

La situation de référence a été représentée à partir d'un zonage à dire d'acteurs (ZADA ; Caron and Cheylan 2005), i.e. en délimitant collectivement sur des cartes les paramètres d'entrée du modèle. Nous avons commencé à travailler à partir de cartes préexistantes, issues de données générales (carte pédologique au 1:100 000, Registre Parcellaire Graphique, orthophotographies, zonages AOP de l'INAO, réseau d'irrigation). Ces cartes ne sont pas toutes adaptées à une interprétation à l'échelle d'un bassin de 45 km². C'est pourquoi les acteurs ont souhaité les modifier pour qu'elles correspondent mieux à leurs connaissances du terrain, notamment en termes de types de sols. Ensuite, les pratiques culturelles (cépages, densités, hauteurs d'écimage, dates de travail du sol, surfaces enherbées, pilotage de l'irrigation) ont été décrites pour chaque système de culture localisé sur les cartes.



Zonage à dire d'acteurs – Oct. 2019

L'ensemble des paramètres et entrées du modèle n'a pas pu être obtenu au cours de cet atelier. Les solutions pour compléter la situation de référence ont été trouvées avec les acteurs : (1) retourner voir certains acteurs pour obtenir des données supplémentaires (ex : distribution des cépages dans l'espace, parcelles engagées en AOP, parcelles enherbées), (2) réaliser un suivi expérimental sur des parcelles viticoles de chaque secteur de production (ex : paramétrage du réservoir utile du sol), (3) utiliser des résultats issus de la recherche agronomique (ex : seuil de déclenchement de l'irrigation).

2.3.2 Suivi agronomique

Au cours de l'atelier 2, les acteurs locaux ont soulevé l'importance de réaliser un suivi expérimental au sein du bassin versant pour calibrer et vérifier les résultats du modèle à l'échelle parcellaire. Deux journées de terrain, avec certains participants de l'atelier, ont permis d'identifier 10 parcelles permettant de représenter la diversité du bassin versant en termes de types de sol, de types de production (AOP, IGP) et de gestion de l'enherbement et de l'irrigation (détaillé dans le Chapitre 4).

Sur chaque parcelle, 5 placettes de 6 ceps, soit 30 ceps au total, ont été suivies de mars à septembre 2020. La contrainte hydrique et les rendements ont été mesurés par le biais :

- d'un suivi de la croissance des apex (toutes les deux semaines, jusqu'à l'arrêt de la croissance) ;
- de mesures du potentiel de base (4 mesures entre fin juin et fin août) ;
- des dimensions de la canopée de la vigne (3 mesures) ;
- du taux de couverture de l'enherbement spontané (toutes les deux semaines) ;
- des composantes du rendement : nombre de rameaux, nombre de grappes par rameau, nombre de baies par grappe, poids moyen des baies, poids frais de récolte (à la récolte) ;
- d'analyses physico-chimiques des moûts (à la récolte) ;
- du $\delta^{13}C$, indicateur cumulé de stress hydrique basé sur le rapport isotopique du carbone dans les baies (à la récolte).

Ce suivi expérimental a permis d'établir la gamme de variation de la contrainte hydrique et du rendement dans le bassin versant (CR de la campagne de mesure envoyé aux viticulteurs en Annexe D). Il a également permis d'estimer la gamme de réservoirs utiles présents dans le bassin, par inversion du modèle de bilan hydrique. Enfin, le couplage des modèles WaLIS (bilan hydrique) et GraY (rendement) à l'échelle de la parcelle viticole a pu être évalué quantitativement, par comparaison entre rendements simulés et observés.

2.3.3 Analyse de la situation de référence

La vérification des résultats de la simulation de la situation de référence s'est déroulée en deux temps. D'abord, nous avons mené une vérification à dire d'experts pendant le troisième atelier qui s'est déroulé avec deux groupes différents : les acteurs régionaux d'une part, les acteurs locaux d'autre part. Nous avons présenté les résultats de simulation pour les 10 parcelles représentatives du bassin versant, pour la période 1981-2010 (exemple en Annexe E). La discussion s'est organisée autour de plusieurs points : (1) les itinéraires techniques pour chaque type de parcelles (dose pour l'irrigation, nombre de travaux du

sol), (2) les dates des stades phénologiques selon les cépages et la localisation des parcelles, (3) les besoins en eau d'irrigation, (4) les niveaux de contrainte hydrique atteints en année sèche, moyenne et humide, ainsi que (5) les rendements et la fréquence d'atteinte des rendements objectifs. Cette discussion à l'échelle de la parcelle a permis de vérifier la cohérence des résultats et de familiariser les acteurs avec le modèle et les types de résultats produits.

La dernière étape de test du modèle consistait à discuter les résultats à l'échelle du bassin versant. Pour ce faire, nous avons commencé par définir des indicateurs pour représenter les résultats, de manière à ce qu'ils soient à la fois informatifs et utiles pour les participants. Ces indicateurs ont été construits à partir des sorties du modèle en définissant des règles d'agrégation spatiales et temporelles, pour représenter les principaux enjeux du changement climatique dans le bassin (ex. risque d'échaudage, besoin en eau pour l'irrigation, production viticole). Cette liste d'indicateurs a été principalement établie avec les acteurs régionaux puis s'est enrichie au fur et à mesure des ateliers.

2.4 Simulations

2.4.1 Les scénarios climatiques

Les scénarios climatiques ont été établis à partir des projections climatiques issues du modèle de circulation régional CNRM-ALADIN version 5.2⁷. Notre étude se limite à un seul modèle climatique pour illustrer de ce que pourrait être le climat futur. Les séries climatiques Aladin-Drias ont été fournies par l'unité AgroClim (INRAE, Avignon) pour les six mailles SAFRAN couvrant le bassin versant (Figure 3.4). Elles couvrent, à pas de temps journalier, la période du 01/01/1950 au 31/12/2005 pour la période historique, puis du 01/01/2006 au 31/12/2100 pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Les variables journalières utilisées sont : le rayonnement global, les températures minimales et maximales de l'air, la vitesse du vent à 10 m, l'humidité relative de l'air et la pluie. L'évapotranspiration de référence ET_0 est calculée selon l'équation de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

La comparaison des données simulées avec celles mesurées, sur la période historique, a montré la nécessité d'effectuer un débiaisage supplémentaire (exemple de la température maximale en Figure 3.6 - les données concernant les autres variables climatiques sont présentées en Annexe F - Tableau 1). Dans un premier temps, l'analyse des séries simulées sur les six mailles SAFRAN couvrant le bassin versant, et leur comparaison sur la période historique avec les données des stations météorologiques proches (voir

⁷Dernière version disponible au début de la thèse. En février 2020, de nouvelles simulations ont été publiées sur le portail Drias, issues de la version 6 du modèle ALADIN (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125&lang=en%20>)

Figure 3.4) a montré l'existence de trois zones climatiques, représentées par les deux mailles du nord, les deux mailles centrales et les deux mailles du sud. Nous avons donc choisi une maille de chaque groupe pour représenter le climat de chacune des trois zones (plaine, collines et coteaux). Dans un second temps, nous avons utilisé les données de la station de Murviel-les-Béziers, contenue dans la maille centrale, pour débiaiser chacune des variables climatiques simulées pour la maille centrale, sur la période 1990-2005. La méthode de débiaisage mise en œuvre est une méthode quantile-quantile, qui corrige la distribution statistique des données simulées de manière à ce qu'elle soit similaire à celle des données observées. Cette procédure est réalisée avec les fonctions disponibles dans le package R « CDFt » (Michelangeli et al., 2009). Dans un troisième temps, nous appliquons aux mailles nord et sud la fonction de correction établie sur la maille centrale. Cette méthode a permis de corriger le biais observé sur la période historique, tout en conservant la variabilité spatiale et temporelle simulée.

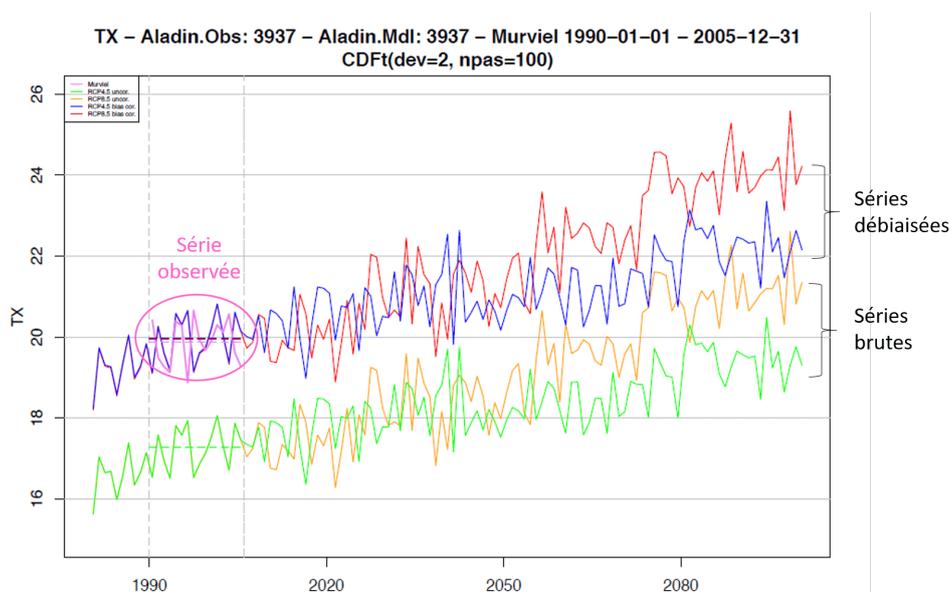


Figure 3.6 Exemple du débiaisage de la température maximale (TX) par la méthode quantile-quantile. Série de contrôle (rose) : station météo de Murviel-les-Béziers sur la période 1990-2005. Séries Aladin-DRIAS : maille 3937 pour les RCP 4.5 (en vert et bleu) et RCP 8.5 (orange et rouge) ; en vert et orange : séries Aladin-DRIAS non débiaisées, en bleu et rouge : séries Aladin-DRIAS débiaisées.

Les séries climatiques ainsi débiaisées sont décomposées selon trois périodes de 30 ans (1981-2010, 2031-2060, 2071-2100) pour les deux scénarios d'évolution du climat (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les cinq scénarios climatiques obtenus (historique, RCP 4.5_2050, RCP8.5_2100, RCP4.5_2050, RCP8.5_2100) constituent les entrées du modèle pour évaluer les impacts du changement climatique, sous climats actuel et futurs. Les scénarios sont présentés succinctement dans le Chapitre 4 et en détails en Annexe F.

2.4.2 Les stratégies d'adaptation

Les résultats de simulation de la situation de référence sous scénarios climatiques futurs ont été présentés et discutés au cours du quatrième atelier (demi-journée). A partir de ces informations, les participants ont été invités à construire des stratégies d'adaptation. Pour ce faire, ils étaient réunis autour d'une carte de la situation de référence. Ils devaient alors y positionner des « cartons » représentant chaque levier modélisable en fonction des stratégies qu'ils souhaitaient voir simulées. A la suite de cet atelier, les stratégies ont été simulées sous le scénario climatique RCP 8.5. Les stratégies d'adaptation n'ont pas été simulées sous le scénario RCP 4.5 pour limiter le nombre d'informations et favoriser leur clarté au dernier atelier.



Hierarchisation des leviers – Juin 2021

Les résultats des simulations des stratégies d'adaptation ont été présentés et discutés au cours du cinquième atelier. Des informations complémentaires ont aussi été apportées, comme des résultats d'expérimentation et une analyse coûts-bénéfices des stratégies d'adaptation à l'échelle de l'exploitation agricole. Ces informations ont été préparées avec une partie des participants aux ateliers en amont de la restitution. Pour ne pas se limiter à une évaluation quantitative de quelques leviers d'adaptation modélisables, les participants ont également été invités à classer l'ensemble des leviers d'adaptation cités au cours du processus participatif, selon leur faisabilité et leur souhaitabilité. Ainsi, nous avons pu comparer les différents leviers entre eux, au-delà d'un aspect « efficacité » calculé par le modèle.

2.5 Récapitulatif des ateliers

Au total, j'ai mené cinq séries d'ateliers. Le Tableau 3.2 reprend les principaux objectifs de chacun d'eux dans l'ordre chronologique. La participation des acteurs locaux est restée stable au cours des ateliers (entre 6 et 9 participants parmi la quinzaine de personnes invitées). Les acteurs régionaux se sont davantage mobilisés à partir de la présentation des premiers résultats (atelier 3). Les cinq acteurs régionaux conviés aux ateliers étaient présents aux deux derniers ateliers.

Tableau 3.2 Objectifs et nombre de participants aux ateliers. Entre parenthèses, le nombre de participants absents à l'atelier qui ont été sollicités individuellement suite à l'atelier

	Objectifs	Acteurs locaux	Acteurs régionaux
Atelier 1	Présenter la démarche générale	6	2
	Construire un schéma conceptuel		
Atelier 2	Présenter le modèle de simulation	5 (+2)	1
	Construire la situation de référence		
Atelier 3	Valider la situation de référence (échelle parcellaire)	8	4
	Etablir les indicateurs d'évaluation		
	Discuter les impacts du changement climatique simulés dans le bassin		
Atelier 4	Construire les stratégies d'adaptation	9	5
Atelier 5	Discuter les stratégies d'adaptation	6	5
	Hierarchiser les leviers d'adaptation		

PARTIE III

Résultats

Chapitre 4

Combiner approche participative et modélisation pour évaluer les impacts du changement climatique

Ce chapitre, qui fait l'objet d'un article en cours de révision, présente le modèle de simulation développé en interactions avec les acteurs. Ce modèle est utilisé pour évaluer les impacts du changement climatique dans le bassin versant du Rieutort, pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

Selon les scénarios climatiques, la production viticole du bassin du Rieutort diminuerait en moyenne de 5 à 14% d'ici l'horizon 2100. Les systèmes de culture les plus productifs situés au sud du bassin (production IGP irriguée) subiraient les plus fortes diminutions de rendement, malgré un doublement des apports en eau d'irrigation. Les températures moyennes pendant la maturation des baies augmenteraient de 6°C en RCP 8.5, ce qui pourrait menacer la qualité des vins dans l'ensemble du bassin.

Les résultats de ce chapitre illustrent comment la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du milieu et des pratiques implique des impacts du changement climatique différenciés. Les nombreuses et précoces discussions avec les acteurs sur le modèle ont facilité la construction et la communication de ces résultats, et de leurs limites. Cette étude constitue une première étape avant de construire des alternatives, i.e. des stratégies d'adaptations, pour limiter les impacts du changement climatique.

Naulleau A., Christian Gary, Laurent Prévot, Victor Berteloot, Jean-Christophe Fabre, David Crevoisier, Rémi Gaudin, Laure Hossard. Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. *Environmental Modelling and Software*. (In revision)

Highlights

- Participation allowed model design tailored to stakeholders' concerns.
- A new grape yield model (GraY) resulted from the participatory modeling approach.
- Without adaptation grape production would decrease from 5 to 16% by 2100.
- Irrigation water needs would double by the end of the century.

Abstract

The diversity of both pedoclimatic and socio-economic contexts in agricultural landscapes makes evaluating the impacts of climate change a challenge. Models are pertinent tools to quantitatively explore possible futures, and participatory approaches help account for local diversity. We developed a modeling approach that involves stakeholders in order to build, test and discuss the results of an original model. We simulated spatially explicit impacts of climate change on water balance, grape phenology, and yield in a Mediterranean vineyard watershed (45 km²) for two time horizons and two climate scenarios. Results show grape production decreasing from 5 to 14% by 2100. Yield decrease will be higher in irrigated high-yield areas despite a doubling of irrigation water supply. A forecasted 6°C increase in temperature during berry ripening will threaten wine quality. The approach allows the construction of a model and the communication of results and limitations to stakeholders. It is a promising means of identifying potential local adaptations to climate change.

Keywords: climate change, grapevine, landscape, multi-scale evaluation, spatially explicit model, stakeholders

1 Introduction

Viticultural systems are experiencing previously unseen conditions resulting from climate changes at a global scale. Higher temperatures move phenological stages to earlier periods; warmer conditions during berry growth and increased water deficits affect yield and must quality (van Leeuwen and Darriet, 2016). Understanding how grapevines are, and will be, impacted by climate change is challenging and requires a combination of approaches (Naulleau et al., 2021). Although conventional modeling approaches provide real advantages in the use of climate projections at large scales, they often do not simulate local growing conditions that might permit viable viticulture under marginal conditions (Mosedale et al., 2016). Participatory approaches can help take account of local constraints and diversity and give pertinent information to decision-makers (Delay et al., 2015).

Dynamic models are important tools for evaluating long-term impacts from an unprecedented combination of change factors – climatic, technical, economic – with multiple uncertainties. Existing crop models for grapevines at field and regional scales have been used with climate projections to evaluate the impacts of climate change on phenology (Caffarra and Eccel, 2011; Garcia De Cortazar Atauri et al., 2017; Webb et al., 2007), water status (Pieri et al., 2012; Tissot et al., 2017), yield (Fraga et al., 2016), and hydrological resources (Carvalho-Santos et al., 2016). In a comprehensive review of grapevine models developed in a context of climate change, Moriondo et al. (2015) argue for the use of low-input dynamic models in order to limit data needs for impact studies at a regional scale. However, such existing models do not consider several management practices (e.g. soil and canopy management, pruning, training systems) closely linked with the local biophysical and socio-economic contexts. Thus they neglect the interplay between local conditions and practices, interactions that have been highlighted as key factors of climate change vulnerability (van Leeuwen et al., 2013). As a consequence, the lack of more detailed and spatially explicit information in prior model-based evaluations of climate change impacts limits their contribution to the design of adaptation policies (Santillán et al., 2019).

Modeling is an iterative process in which the involvement of stakeholders can help offset the limits of “conventional” models by creating a shared representation, enhancing the understanding of a dynamic system, and supporting decision making (Voinov, 2008; Voinov et al., 2018). Participatory modeling allows the integration of local knowledge in fine-resolution analyses (Murgue et al., 2016), discussions about model functioning with stakeholders (Hossard et al., 2013), and the production of meaningful indicators (Allain et al., 2018a). Involving stakeholders in modeling processes also helps us consider different scales, which is crucial to agricultural system analysis (Delmotte et al., 2013). For example, the field scale is needed to identify the relationship between plant water requirements and production when adapting management practices, while up-scaling to the regional level enables the consideration of connectivity (hydrology, biodiversity), spatial heterogeneity (climate, soil, slope), and aggregated indicators that facilitate decision-making at the policy level (e.g. extension of irrigated areas, evolution of total production). Previous studies have shown that participatory modeling is particularly suitable for analyzing the effects of complex and uncertain situations such as climate change on various agricultural systems like rice (Delmotte et al., 2017), mixed cropping and grazing (Rodriguez et al., 2014), and livestock systems (Duru et al., 2012).

To date, there have been few quantitative evaluations involving stakeholders that examine the impacts of climate change on grapevine systems. We found only two examples (Delay et al., 2015; Tissot et al., 2017) using agent-based modeling approaches: Delay et al.

(2015) studied a small number of biophysical processes (grape acidity) in a medium scale area (39 km²), and Tissot et al. (2017) considered a larger number of processes (phenology, water balance, grape ripening) but in a smaller area (1 km²). We believe a new modeling approach that includes stakeholders can help coordinate the attention to spatial scale and simulated processes in a way that allows the quantitative evaluation of climate change impacts on a wider range of processes (including grape yield) and in a medium scale area. Such an approach should be particularly attentive to both model transparency (Voinov and Bousquet, 2010) and the representation of model outputs (Allain et al., 2018a).

With respect to transparency, part of our study was dedicated to reducing the model complexity of grape yield in order to improve its understanding. Recent developments show that yield components can be expressed as functions of water stress indicators at critical periods. Van Leeuwen et al. (2019) proposed a model based on expert knowledge, and Guilpart et al. (2014) incorporated more experimental data, demonstrating a relationship between yield components and grapevine water status during critical periods over the course of two years. Overall, evidence seems to indicate that semi-empirical modeling with limited parameters would be judicious and appropriate for a participatory approach to simulate grapevine yields. The representation of model outputs concerns the evaluation indicators, which are found in the spatial and temporal aggregations of the model outputs or climate variables and used to simplify and structure discourses that address stakeholders' objectives and interests (Allain et al., 2018a).

The research reported in this paper aims at proposing an original modeling approach that integrates stakeholders in the process of quantifying site-specific climate change impacts. It was applied to a viticultural watershed in southern France and designed to fulfill the following objectives: (1) to use dynamic modeling to incorporate climatic predictions provided by the IPCC over a long time period, (2) to involve stakeholders in an effort to increase local pertinence that represents spatial diversity and several scales, from the field to the watershed, and (3) to produce meaningful indicators that show the impacts of climate change on viticulture and water management in the watershed. The participation of stakeholders for conceptualization, model testing in the reference situation, and discussion of the simulations under future climatic conditions helped improve simulation quality and understanding. Our study also led to the development of an *ad hoc* grapevine yield model, called GraY (Grape Yield), included in an original watershed model. Our results could be useful for local stakeholders and decision makers (wine growers, public institutions, technical adviser, etc.) to identify the most vulnerable areas and then assess site-specific solutions for adaptation.

2 Material and methods

2.1 Study area

The study took place in southern France (Figure 4.1), where viticulture is an important economic activity and is particularly sensitive to climate change. We chose the Rieutort watershed (45 km², 43.5° N, 3.1° E) as a case study because of its location between the southern coastal plain (581 mm mean annual rainfall, data Puisserguier weather station 2000-2019) and the relief of the hinterland to the North (705 mm mean annual rainfall, data Cabrerolles weather station 2000-2019). This area encompasses a diversity of active viticultural systems (1,500 ha): 20 % of the vineyards are located on shale soils in the mountainous area to the North, 60 % are on mainly clay-limestone soil in the central foothills, and 20 % are on more or less differentiated terraces of alluvial soil in the southern part of the watershed. The total vineyard area is divided into two main production types: a protected designation of origin (PDO) characterized by low yields of high-quality wine, and a protected geographic indication (PGI) characterized by higher yield objectives. Irrigation is used in 10 % of the vineyard area (southern portion of the study area).

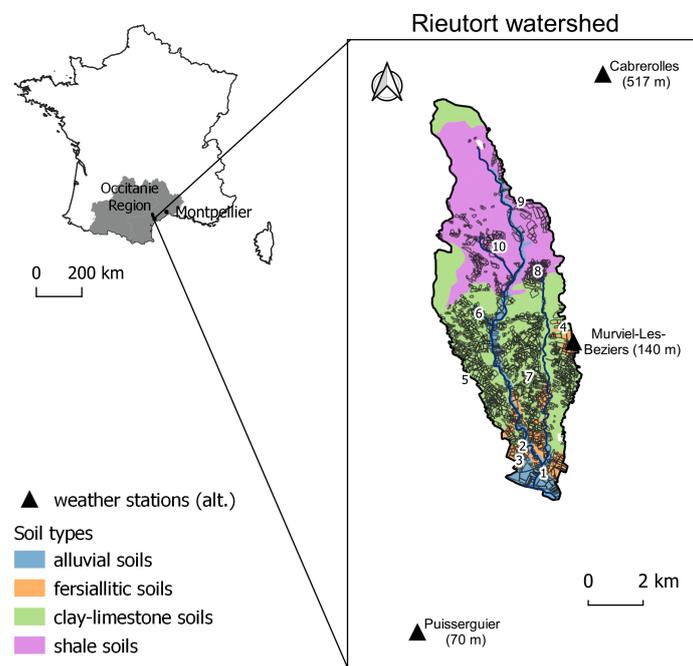


Figure 4.1 Case study area. Blue lines: main streams; black lines: vineyard plots (based on the French Land Parcel identification system, RPG 2017), other lands being mainly forest and scrubland. Soil types are derived from the 1:100 000 soil map of Lodève (Bonfils, 1993). Numbers corresponds to the location of the 10 experimental plots (see section 2.2.2). alt: altitude above sea level.

2.2 Participatory modeling approach

Our modeling approach was designed according to the key principles of participatory modeling (Voinov, 2008). It took place in alternating collective workshops and model development phases. A preliminary phase of individual interviews was dedicated to the identification of key stakeholders and to the understanding of the main features of the territory and its cropping systems. The modeling framework was divided into three main steps which were accomplished over the course of four workshops (WS) (Figure 4.2). The involvement of stakeholders began early in the process. The first step was devoted to the construction of the model, including the conceptualization of the system with stakeholders, the selection of the model components (referred as modules hereafter), their numerical implementation, and the transformation of model outputs into evaluation indicators. In the second step, the model was parameterized and tested, relying on field measurements and the baseline simulation of historical climatic conditions developed with stakeholders. Analysis of the results from model testing led to refinements of the numerical model. A third step entailed simulating the baseline situation in future climatic conditions and discussing its results with the stakeholders.

Table 4.1 presents the participation of stakeholders. Participants were drawn from the viticulture and water management sector. Researchers participated as “scientists”, according to terms described by Leenhardt et al. (2012), to provide scientific knowledge on the investigated processes and the corresponding computer models. One researcher acted as a facilitator. The participants in WS3 and WS4 were divided into two sub-groups: local and regional (number of participants was limited by Covid-19 restrictions), leading to six WS in total.

2.2.1 Step 1: model construction

The first workshop (1 day) was dedicated to (1) sharing perceptions on climate change and its impacts, and (2) building a conceptual scheme describing the system. During the workshop, non-researcher participants (9 stakeholders) were asked to describe an outstanding climatic event they associated with climate change, and its consequences. Participants were then divided into two sub-groups and asked to list all adaptation levers they wanted to consider. After pooling the levers, stakeholders selected the most important and detailed the agricultural context that would allow or prevent their implementation. After the workshop, researchers synthesized the collected information into a conceptual scheme in which information was classified as input variables, processes, or output variables. We hypothesized that the coupling of existing models could represent

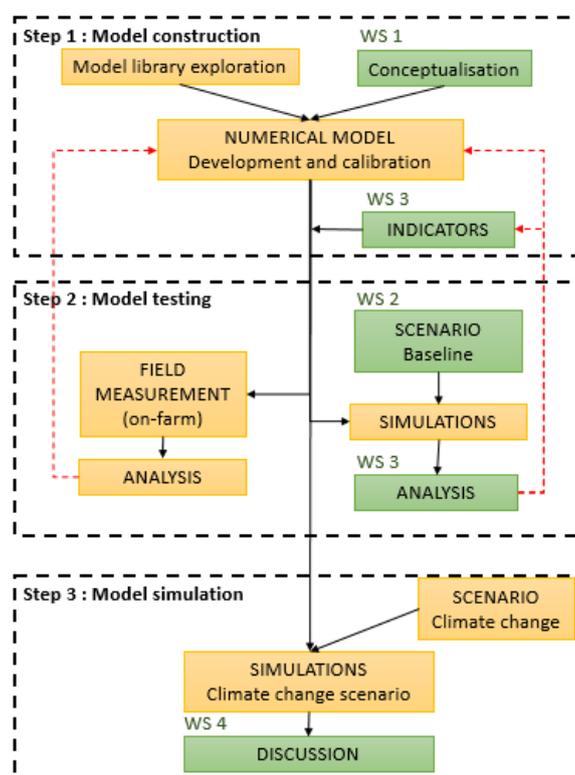


Figure 4.2 Participatory modeling framework. In green: activities carried out with the stakeholders, in orange: activities conducted by the researchers; WS: collective workshop; black arrows: sequence of activities; red arrows: feedbacks.

Table 4.1 Number of representatives by type of stakeholders. Int: interviews, WS: workshop, PDO: protected designation of origin. WS3 and WS4 were each carried out in two groups: (a) with regional stakeholders and (b) with local stakeholders

Type of stakeholders	Int.	WS1	WS2	WS3a	WS3b	WS4a	WS4b
<i>Viticulture:</i>							
Wine growers							
-Cooperative cave	3	2	2	-	2	-	2
-Independent cave	5	1	1	-	2	-	2
PDO syndicate	1	1	1	-	1	-	1
Cooperative cellar representative	1	1	1	-	1	-	1
Extension and advisory services	5	-	-	2	1	3	2
<i>Water:</i>							
Agro-environmental coordinator	2	2	2	1	1	1	1
Regional policy maker	2	1	-	1	-	1	-
Local policy maker	1	-	-	-	-	-	-
<i>Researchers</i>							
Total	20	12	11	8	10	9	13

the system described by the stakeholders. So we examined a collection of existing models recently reviewed in Costa et al. (2015) and Moriondo et al. (2015) and made a selection according to the conceptual scheme and the availability of data.

We identified four main modules (i.e. piece of model) that aligned with the stakeholders' primary aims and could be assembled to constitute a vineyard watershed model (Figure 4.3): phenological, crop water balance, yield, and hydrological modules. We chose the grape phenological model recently developed by Morales-Castilla et al. (2020) to forecast budburst, flowering, and veraison dates (maturity being fixed 35 days after veraison). We used parameters from three varieties (Chardonnay, Syrah, and Cabernet Sauvignon) that have different phenologies and are grown in the Rieutort watershed. Calculated phenological stages were inputs for the daily water balance model. We chose the WaLIS model (Celette et al., 2010) for the simulation of water balance because it has been frequently used in the Mediterranean area (Delpuech and Metay, 2018; Gaudin et al., 2014), and was familiar to a number of the stakeholders. The WaLIS model allowed the consideration of three adaptation levers cited by stakeholders: cover crop management, grapevine canopy management, and irrigation. We implemented an automatic irrigation schedule which was activated when the calculated Fraction of Transpirable Soil Water (FTSW) decreased under thresholds that vary according to the phenological stages and production objectives. We used the thresholds proposed by Ojeda (2007) to maintain a low to moderate constraint: FTSW of 0.21 between budburst and flowering, 0.12 between flowering and mid-flowering-veraison, 0.07 between mid-flowering-veraison and veraison, and 0.04 between veraison and maturity). WaLIS includes the calculation of runoff based on the curve number method (CN) which is determined from given empirical values, according to land cover, soil hydrological group, and soil state surfaces (Romero et al., 2007; USDA, 1993). It has the advantage working on a daily time-step which is consistent with the climatic projection data. Stakeholders noted total runoff in the watershed as an issue under future climate conditions (decreasing river flow, flood risk, and lower rainfall efficiency). Therefore, we added a hydrological module that derived from the MHYDAS model (Moussa et al., 2002) and that instantaneously distributes water into the downstream plots, or into streams. The connectivity rules between plots, and between plots and streams, were derived from the Geo-MHYDAS model (Lagacherie et al., 2010).

Finally, stakeholders highlighted decreasing yield as one of the major sources of concern when dealing with climate change issues. However, we determined that the existing grape models (Moriondo et al., 2015) did not fit our specifications in terms of data availability and consistency with the other chosen models. Consequently, we tailored an *ad hoc* model (Affholder et al., 2012) that coupled the WaLIS model with a Grape Yield response to water model (GraY) derived from Guilpart et al. (2014) (detailed in section 3.1.2).

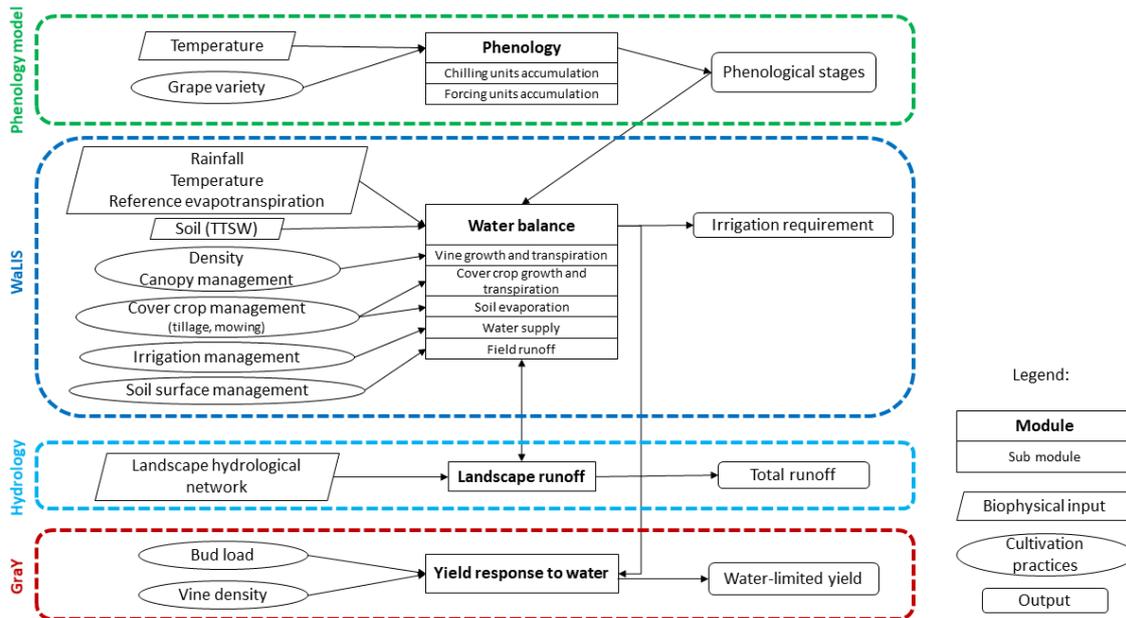


Figure 4.3 Numerical simulation model composed of 4 modules: phenology (Morales-Castilla et al., 2020), water balance (Celette et al., 2010), a yield response to water module adapted from Guilpart et al. (2014) and a hydrological module derived from Moussa et al. (2002) and Lagacherie et al. (2010). TTSW: Total transpirable soil water. The spatial and temporal model coupling is implemented in OpenFLUID environment at daily time-step.

2.2.2 Step 2: model parameterization and testing

2.2.2.1 Definition of the baseline situation

The second workshop was dedicated to the description of the current grapevine production system, the objective being to implement the watershed model in the baseline situation. First, researchers presented the model together with the conceptual scheme, highlighting the processes included in or excluded from the simulation model. After a discussion about model components, stakeholders described the current situation in order to obtain spatially explicit input parameters. Researchers presented the available maps on land

use, irrigated areas, PDO delimitation and soils. Existing information was reviewed by stakeholders and corrected during a participatory mapping exercise. The stakeholders also described practices of irrigation (supply, frequency, restrictions), canopy management (rows spacing, canopy height and bud load), and cover crop management (sowing dates, covered surfaces, tillage or mowing dates) for the different types of grapevine production systems. They then localized those practices on the map. Some information was difficult to collect during the workshop. Therefore, additional information (e.g. varietal distribution in space) was provided later by local participating institutions.

After the workshop, the researchers transformed the collected information into model inputs to simulate the baseline situation. Since we did not have spatialized data for the varieties, we calculated the portion of early, mid, and late ripening varieties by type of production, using the data provided by the stakeholders. Then we attributed a variety type (early, mid, late ripening) to each vineyard plot according to its type of production and with respect to the calculated ratios. We only simulated the yield response to water (GraY model) for the Syrah variety (constituting 50% of the Rieutort vineyard area), because we did not have sufficient data nor the local expertise for calibrating other varieties. The third workshops (WS3a and WS3b, four hours each) were dedicated to the discussion of the simulation results for the baseline situation at the field scale and for historical climate (1981-2010). This included graphical representation of model outputs for 10 representative situations (e.g. yield, phenological date, daily runoff, vine water status). During the presentation, stakeholders were asked to share their analysis of the simulation results, their agreement or disagreement, as well as their suggestions to improve the model. This step allowed the adjustment of some model inputs and parameters before presenting the results at the watershed scale.

The adjustments suggested by stakeholders during the parametrization step led us to conduct on-farm monitoring. This was (i) helpful in building trust in the model with a quantitative comparison of observed and simulated data, and (ii) it allowed us to estimate soil parameters (TTSW: total transpirable soil water) that could not be estimated by stakeholders during workshop.

2.2.2.2 Field monitoring network

The quantitative evaluation of the WaLIS-GraY model (i.e., coupling of WaLIS and GraY models) was based on on-farm data collected in the Rieutort watershed. We monitored the grape water status and yield components of 10 contrasting plots (soil type, production type, cover crop management, and irrigation access) on the basis of the production systems described by stakeholders in WS2 (Figure 4.1 and full description in Appendix G – Table A.1). For each plot, 30 plants were monitored from March to September 2020. The grapevine water status was monitored during summer (three measurements from June to August) by measuring the predawn leaf water potential with a pressure chamber (Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, USA), on 12 fully expanded leaves per plot. The yield, shoot, and bunch numbers were measured on the 30 vine plants. On each of these plants, one bunch was randomly selected to obtain the number of berries per bunch and the averaged berry weight from a sample of 200 berries.

To simulate the grapevine yield with the WaLIS-GraY model, we first parameterized the WaLIS model (Celette et al., 2010) that simulates the time course of FTSW (Fraction of Franspirable Soil Water) at a daily time step. Simulations were conducted for the 10 plots, from September 2018 to September 2020. We used the weather data recorded at the weather station of Murviel-les-Beziers (Figure 4.1). Maximum crop coefficient (K_{max}) was calculated with the model of Riou (Riou et al., 1989) using measurements of the average canopy size (height, wide, porosity) of the 30 vine plants in each plot. Parameters describing spontaneous cover crops (e.g. LAI growth rate, leaf life span) were taken from Andrieux et al. (2015). Total transpirable soil water was estimated by inversion of the WaLIS model (Pellegrino et al., 2006). Parameter values for all the simulations are given in Appendix G - (Table A.2). The quality of the simulations was assessed against observed values of predawn water potential converted into FTSW (Lebon et al., 2003), observed yield and yield components. Four statistical criteria were calculated to assess the model performance: the model efficiency (EF), the coefficient of determination (R^2), the normalized average error (NAE), and the normalized root mean square error (NRMSE) (Janssen and Heuberger, 1995).

2.2.2.3 Choice of output representations

The third workshops were also tasked with choosing the evaluation indicators (i.e., the model outputs representations) that would be presented at watershed scale during the following workshops. After discussing the outputs of the model at the field scale, stakeholders selected those of interest. For each selected output, researchers asked stakeholders to define the relevant temporal aggregation (e.g. seasonal variability, annual mean), spatial aggregation (e.g. mean by soil type, by production type), and type of representation (map, bar plot, table).

2.2.3 Step 3: model simulations at watershed scale

Future climate data were obtained from the regional climate model CNRM-ALADIN version 5.2 (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125&lang=en>). Projections were bias corrected using the cumulative distribution functions (CDF) transformation proposed by Michelangeli et al. (2009). We used the daily meteorological data from Murviel-les-Beziers weather station (Figure 4.1) between 1990 and 2005, to correct the projections on the central climatic area of the watershed (Table 4.2). The same correction was then applied to the northern and southern climatic areas (Appendix G – Table A.3). We simulated the baseline situation described by stakeholders for the historical period (1981-2010), two time horizons (2039-2060 and 2069-2100), and two Representative Concentration Pathways (RCP 4.5 and 8.5). The reference evapotranspiration ET_0 was calculated according to Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998).

Table 4.2 Simulated average and standard deviation of climatic characteristics for the central area of the Rieutort watershed (Data Meteo-France – CNRM-ALADIN). Annual values were calculated from September to August; growing season values from April to September. RCP: Representative Concentration Pathway

	1981-2010	2031-2060		2071-2100	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Annual precipitation	692 mm (±257)	-1.2 %	-8.5 %	-1.9 %	-12 %
Growing season precipitation	229 mm (±119)	+3.9%	-3.5 %	+12.8%	-10.9 %
Annual mean temperature	14.4°C (±0.5)	+1.2°C	+1.6°C	+2.1°C	+3.9°C
Growing season mean temperature	19.2°C (±0.9)	+1.5 °C	+1.9°C	+2.4°C	+4.6°C
Annual cumulated ET_0	986 mm (±148)	+7.5 %	+9.5 %	+12.0 %	+ 21.0%

In the near future (2031-2060), the increase in temperature and reference evapotranspiration are similar for RCP 4.5 and 8.5. Conversely, growing season precipitation is predicted to increase in RCP 4.5, while it is predicted to decrease in RCP 8.5. Changes in the far future (2071-2100) are accentuated in RCP 8.5, with an increase of 4°C in temperature, and a decrease of 12% in rainfall. It is worthy to note that the growing season rainfall is projected to increase (+12%) in RCP 4.5. Similar trends are observed for the northern and southern climatic areas. By the end of the century, in RCP 8.5, temperature increase will be more pronounced in the northern areas (+5°C) and annual rainfall will decrease below a critical threshold for grapevine growth in the southern areas, with an average annual precipitation of 520 mm (Appendix G – Table A.3).

Finally, we ran the watershed model of the baseline situation, with the five climate scenarios. The results of the simulations were presented to the two groups of stakeholders in WS4a and WS4b (4 hours each). After a brief reminder of model characteristics and climate change scenarios, the simulations results were presented using the indicators collectively built in WS3. After the presentation, stakeholders were asked to share their analyses of the scenario simulations.

2.3 Modeling software and representations

The spatial and temporal model coupling was developed using the OpenFLUID software platform for spatial modelling in landscapes (<http://www.openfluid-project.org>) (Fabre et al., 2013). The open source software framework and user environment OpenFLUID was chosen for its original features that are relevant for this work:

Highlights

- representation of simple and complex landscapes, such as agricultural landscapes, made of spatial objects with associated attributes and spatial connections,
- easy integration of existing modules or development of new modules,
- spatio-temporal model coupling, at various scales,
- adaptable input and output data formats for easier pre and post processing.

The complete coupled model (Figure 4.3) was implemented as plugged modules in the OpenFLUID platform, using C++ language and embedded R code (Eddelbuettel et al., 2020). Simulations were defined as parameterized OpenFLUID projects, and results were post-processed using the R software (Team, 2018), with “ggplot” (Wickham, 2016) and “cartography” packages (Giraud et al., 2020).

3 Results

3.1 From the conceptual scheme to the simulation model

3.1.1 Conceptualization with stakeholders

The first workshop (WS1) completed two tasks: (a) a list of climate change impacts and corresponding adaptation levers that were collectively discussed, and (b) a conceptual scheme constructed by researchers and based on the workshop discussions. During the workshop, a consensus around preoccupying climatic events was reached, with a particular focus on the water and temperature regimes (e.g. increase in intra-annual rainfall variability, frequency of heavy rains, heat waves, strong winds). The participants identified a large range of impacted processes following such events: agronomic (yield, plant mortality, phenology, pest pressure), environmental (streamflow, irrigation water consumption), and economic (regional economy, irrigation costs). They considered various adaptation levers which they were asked to classify according to spatial and time scales. Two groups of adaptation levers were discussed: long-term adaptations at planting (row orientation, drought tolerant varieties, training system, rootstocks, etc.), and seasonal adaptations (canopy management, organic fertilization, irrigation, etc.). The opportunity or challenge to implement these adaptations levers depend on various aspects of the landscape (water access, PDO delimitation), the farm (adaptive capacity, equipment, investment capacity, yield objective, winery, etc.), and the field (soil type, vine age, slope, PDO regulations).

Researchers designed a conceptual scheme based on the elements collected during WS1 (Figure 4.4) and presented it to stakeholders for validation in WS2. The comparison between the conceptual scheme and existing simulation models led to the modeling choices described in Section 2.2.1. The absence of non-simulated processes and adaptation levers could be explained by the lack of data in the watershed (e.g. farm data, soil analyses), the absence of modeling tools (e.g. farm-decision model, pest pressure), or the lack of certain information (rootstock effect, yield response to water for different training systems and varieties). Yield quality and heat damage were not directly modeled because the discussion primarily focused on the relationship between yield quantity and water availability. However, agro-climatic indicators that give information on climatic risk on yield and its quality were designed with the stakeholders later in the process (see section 3.2.3).

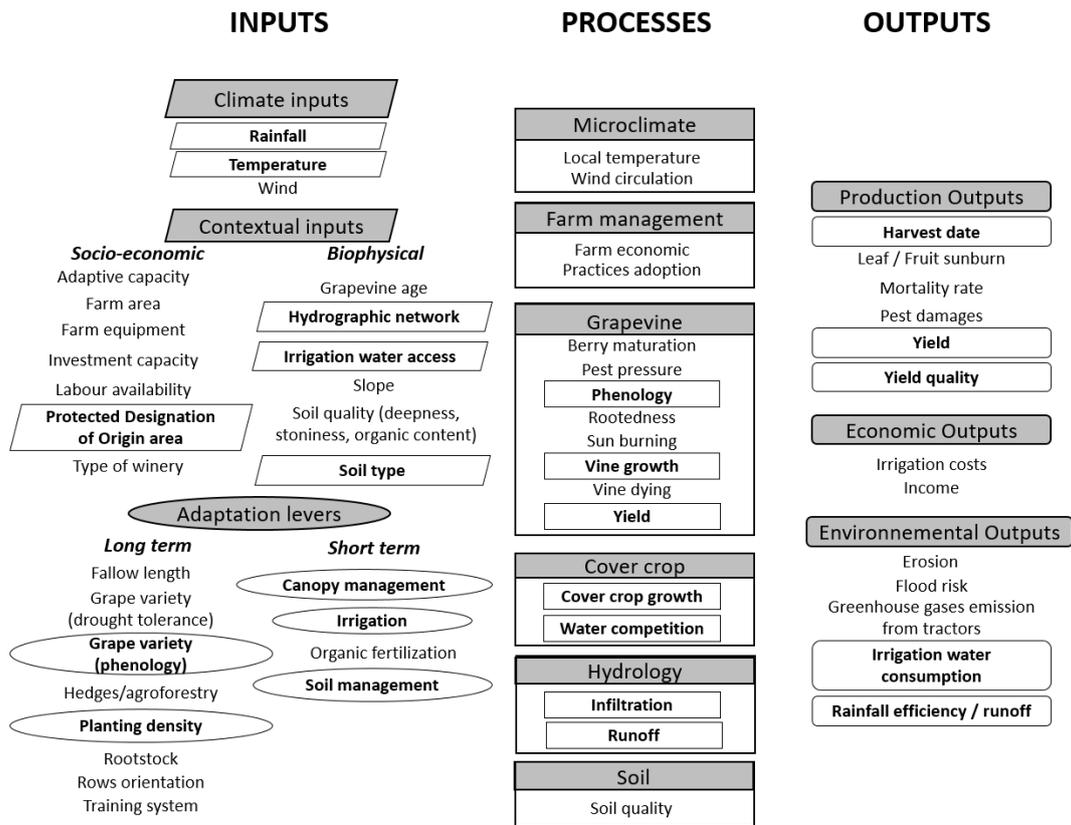


Figure 4.4 Conceptual scheme derived from WS1 discussion. Inputs are indicated on the left, model components with associated processes in the middle, and outputs on the right. Only the framed and bold items are included in the watershed simulation model.

3.1.2 Development of the grape yield model GraY

The complete numerical model is presented in Section 2.2.1. Here, we detail the Grape Yield model (GraY) which was developed after recognizing the importance that participants gave to the evaluation of grapevine yield evolution under future climatic conditions.

The grapevine yield was decomposed as in Guilpart et al. (2014):

$$Yield = nShoot * fBud * nBerry * wBerry * 10^{-3} \quad (4.1)$$

where:

$Yield$ is the fresh yield (in kg/plant),

$nShoot$ is the number of shoots per plant (fixed by pruning operation),

$fBud$, $nBerry$, and $wBerry$ are bud fertility (i.e., number of bunches per shoot), the number of berries per bunch and the mean berry weight (in g), respectively.

Each of these yield components was calculated as a function of the soil water availability simulated by the WaLIS model (FTSW), at critical phenological phases. These response functions were parameterized with data sets from Guilpart et al. (2014) and Gaudin et al. (2014) (complete dataset description in Appendix G – Table B.1). Daily simulated FTSW were averaged for thermal time periods of 100°Cd (cumulative thermal degree in base 10) from budburst to harvest. For each period the Pearson coefficient between each yield component and mean FTSW was calculated, and its significance was tested. By this means, we identified four critical periods – consistent with Guilpart et al. (2014) – during which yield component values are highly and significantly correlated with mean FTSW: between 500 and 600°Cd in year n-1 for bud fertility, between 700 and 800°Cd in year n-1 for berry number per bunch, between 800 and 900°Cd, and between 1400 and 1500°Cd in year n for berry weight (detailed in Appendix G – Fig. B.1).

The response curve of yield components to mean FTSW during critical period ($\overline{\text{FTSW}}_{crit}$) was derived from these statistical analyses (Figure 4.5A, B, C). Each yield component remained at maximum between $\overline{\text{FTSW}}_{crit} = 1$ and a threshold value, and decreased linearly between FTSW_{th} and $\overline{\text{FTSW}}_{crit} = 0$. Yield component maximum, minimum, and threshold values were obtained using the Nelder-Mead optimization algorithm (Nelder and Mead, 1965). Bud fertility varied between a minimum of 0.2 bunches/shoot and a maximum of 2 bunches/shoot. Number of berries per bunch varied between a minimum of 65 berries/bunch and a maximum of 200 berries/bunch. Berry weight varied between a minimum of 1 g and a maximum of 2 g. Threshold values FTSW_{th} were 0.7, 0.6 and 0.22, respectively.

Simulated and measured yields were compared for the two data sets together (Figure 4.5D). The overall correlation was significant ($r^2=0.79$, $p < 0.05$) and proved the capability of the WaLIS-GraY model to catch the major sources of variability found in the experimental yield data. The values of NRMSE (29%) and model efficiency (0.6) attest to the ability of the modeling solution to reproduce measured yields. Simulated yields tended to be higher than the observed ones, especially for high yields (NAE = 0.16). A possible reason is the lack of consideration for other limiting factors, such as nitrogen, as evidenced by Guilpart et al. (2014).

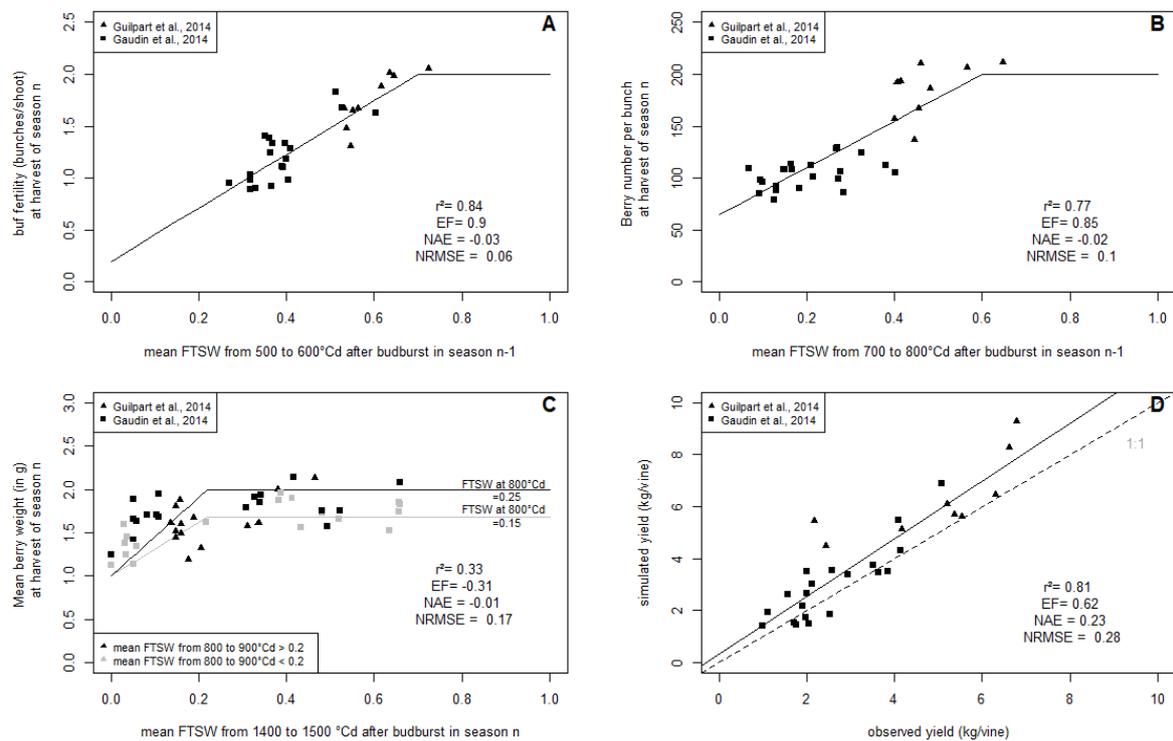


Figure 4.5 Grape Yield model (GraY) calibration for Syrah variety: A) bud fertility, B) number of berries per bunch and C) berry weight as a function of the mean fraction of transpirable soil water during the corresponding critical period (\overline{FTSW}_{crit}). D) Simulated and observed yield (supplementary figures in Appendix G – Fig B.2). r^2 : coefficient of determination; EF: model efficiency; NAE: Normalized average error; NRMSE: Normalized root mean square error.

3.2 Model testing

3.2.1 Description of the baseline situation

The second workshop started with the identification of the key location factors that determine the spatial distribution of grapevine production systems. Stakeholders first considered soil type as the main factor. They modified the soil map to delimit five main units. Alluvial and fersiallitic areas were unchanged, but the “clay-limestone” area was divided into two areas that identify the soils from the central part of the watershed as more shallow and stonier. They also divided the “shale” area into two areas, indicating more soil heterogeneity in mountainous areas, although those areas were difficult to delimit precisely. Cover crop management was identified as closely linked to soil type due to different levels of weed competition and soil water availability. Three characteristics of cover crop management were described: a destruction date of spontaneous winter cover (from the 15th of February for alluvial, fersiallitic, and non-stony clay limestone soils to the

1st of March for other soils), a date of mechanical tillage after harvest (15th of October for southern sector only), and a number of inter-rows kept covered during summer (1 inter-row in 4 for 33 ha in the watershed).

The second factor that stakeholders highlighted as a key determinant of spatial distribution of grapevine production systems was the type of wine production (PDO or PGI) directly linked with yield objectives. The location of PDO production areas was provided by PDO syndicate representatives; PGI areas were deducted from all the remaining areas. For each type of production, stakeholders reported the planting density (from 4000 vines/ha in PDO area on shale soil to 4500 vines/ha for other areas), the canopy height (from 1.1 m to 1.4 m), the bud load (from 9 to 15 buds/vine), and the grapevine varieties. We found no early ripening varieties in PDO production sectors, which averaged 80% mid-ripening varieties and 20% late-ripening varieties. By contrast, the variety distribution in PGI sectors averaged 30% early-ripening, 40% mid-ripening and 30% late-ripening varieties.

The last factor was the access to water irrigation for PGI production in the southern part of the watershed. Opinions on the irrigation management to implement in the model varied among the local and regional stakeholders, but finally, irrigation supplies were fixed at 20 mm for the first supply and 10 mm afterwards, with unlimited annual supply from budburst to harvest. These factors led to eight production sectors which are presented in Figure 4.6. Each sector corresponds to a block of similar grape growing systems (soil, type of production, irrigation practices). Sectors 1 to 3 are in the southern climatic area, sectors 4 to 6 are in the central climatic area, and sectors 7 and 8 are in the northern climatic area.

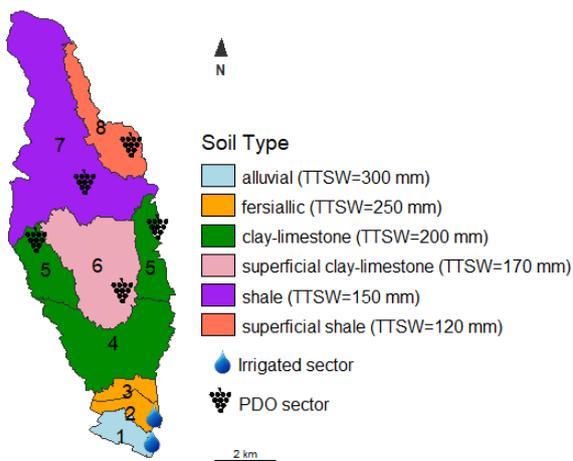


Figure 4.6 Presentation of the baseline situation according to the eight production sectors defined during the second workshop. TTSW = Total transpirable soil availability determined by the WaLIS model inversion. PDO: Protected designation of origin.

3.2.2 Quantitative evaluation of the WaLIS-GraY model with on-farm measurements

The 10 monitored plots, located in the eight production sectors, produced yields ranging from 1.03 to 7.73 kg/vine. Water status varied significantly during the 2020 season which was characterized by a wet spring (244 mm from March to May) and a dry summer (81 mm from June to August), thus allowing soil water recharge at the beginning of the season followed by a progressively important water constraint. Measured predawn water potential in mid-August ranged from -0.4 to -0.9 MPa. Table 4.3 shows the evaluation indicators of the WaLIS-GraY model, including soil water availability (FTSW) and yield components. The simulated FTSW were in accordance with measured predawn water potentials for eight of the 10 plots ($EF > 0.57$). The differences between simulated and observed FTSW could be explained by the low ability of the WaLIS model to simulate a goblet training system in plot 8 and by the lack of consideration for leaf damage caused by disease that was observed in plot 4. The normalized average error was between 6 and 35% and was negative for seven plots. Simulated data tended to overestimate soil water availability. The GraY model was quite proficient at simulating grapevine yield. The R^2 and EF values were 0.86 and 0.71, respectively. The normalized average error was negative (-0.21%, i.e., -0.58 kg/vine) showing a yield underestimation, with variation among fields. While simulated bud fertility – a major determinant of grapevine yield – showed a positive model efficiency ($EF = 0.27$), the simulated number of berries and berry weight exhibited a negative model efficiency. Nevertheless, R^2 and NRMSE were satisfactory and significant ($R^2 = 0.53$ and 0.49 , $NRMSE = 0.27$ and 0.19 , resp.).

Table 4.3 Goodness-of-fit indicators of the simulations performed with the WaLIS-GraY model for the 10 experimental plots (supplementary figures in Appendix G – Figure A.1). FTSW: Fraction of soil transpirable water, fBud: bud fertility, nBerry: number of berries per bunch, wBerry: berry weight in g. N: Number of observations; R^2 : coefficient of determination (* $p < 0.1$, ** p -value < 0.05); EF: model efficiency; NAE: Normalized average error; NRMSE: Normalized root mean square error.

	FTSW										Yield component			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	fBud	nBerry	wBerry	Yield
N	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	10	10	10	10
R^2	0.85	0.98*	0.96	0.41	0.99*	0.87	0.96	0.97*	1**	0.98*	0.44**	0.53**	0.49**	0.86**
EF	0.61	0.89	0.95	-5.8	0.70	0.57	0.53	-1.37	0.86	0.98	0.27	-0.32	-0.67	0.71
NAE	0.20	0.15	-0.06	-0.26	-0.32	-0.30	-0.35	1.21	-0.31	-0.05	0.09	-0.22	-0.15	-0.21
NRMSE	0.34	0.34	0.16	0.60	0.37	0.42	0.39	1.30	0.32	0.14	0.36	0.27	0.19	0.37

3.2.3 Evaluation indicators for watershed simulation

The second part of the third workshop produced a list of indicators aimed at representing the impacts of climate change at watershed scale (Table 4.4). The group of regional stakeholders (WS3a) selected mainly field-scale indicators to represent the level of grape production and water use (irrigation and runoff). They also designed indicators to estimate the climatic risks on grape production, in terms of both quantity and quality. Those indicators consisted of identifying the temperatures that are detrimental to the vine production (frost, scalding, berry maturation conditions). Researchers added some indicators which relate to the entire watershed, because up to this point the watershed scale had not been fully represented. The added indicators relate to climate change impacts highlighted in WS1 (Table 4.4).

Table 4.4 List of co-designed indicators, along with their description, scale and source (S: stakeholders, R: researchers)

Indicator	Description	Scale	Source
<i>Production</i>			
Yield	30-years yield average (t/ha)	Sector	S
Total grape production	30-years average of the total amount of grapevine production (in 1000 hl)	Watershed	R
<i>Risk to production</i>			
R_frost	Number of years over 30 with Tmin <0°C between budburst and flowering dates	Climate area	S
R_heat	Number of years over 30 with Tmax >40°C between flowering and veraison dates	Climate area	S + (Crespy, 1992)
R_Tmax_mat	Number of years over 30 with Tmax >37°C between veraison and maturity dates	Climate area	S + (Bergqvist et al., 2001)
R_Tmin_mat	Average Tmin between veraison and maturity dates (°C)	Climate area	S + (Tonietto and Carbonneau, 2004)
Ampli_T	Average Tmax – Tmin between veraison and maturity dates (°C)	Climate area	S + (Neethling et al., 2012)
<i>Water</i>			
Irrigation needs	30-years average of the annual amount of irrigation water requirement (mm)	Field	S
Seasonal irrigation needs	30-years average of monthly amount of irrigation water requirement (mm)	Field	R
Total irrigation needs	30-years average of annual amount of irrigation water (m ³)	Watershed	R
Total run-off	30-years average of the annual sum of runoff reaching the hydrological network (m ³)	Watershed	S

3.3 Simulations under current and future climatic conditions

3.3.1 Phenological dates and associated climatic risks

In the historical period (1981-2010), phenological stages (budburst, flowering, veraison and maturity) occur earlier in southern areas than in northern areas (Figure 4.7A). This 13-day difference between harvest dates was confirmed by stakeholders in WS4 and is mainly due to milder temperatures and late-ripening varieties in the northern areas. At the horizon 2050, the two climate scenarios show similar predictions with harvest dates being 10 days earlier, on average, than historical dates. At the horizon 2100, phenological advance is more pronounced for RCP 8.5, with a more important advance in the northern areas, where budburst occurs 13 days earlier, and harvest occurs 23 days earlier. Projected phenological dates show a shortening of the grapevine cycle ranging from 2 (RCP4.5_2100) to 10 days (RCP8.5_2100). Earlier budburst does not lead to an increased risk of frost because the date of the last frost in climate projection also advanced (Figure 4.7B). However, stakeholders professed: “*despite the lesser occurrence of frosts, we are still afraid of a late frost*”. The combined effects of advanced phenology and increased temperatures lead to an increased risk of heat damage between flowering and veraison by the horizon 2100. Berry maturation conditions change faster. For the time horizon 2050, night temperatures increase by 3.5°C and maximal day temperatures exceed 37°C more than two years in three, which could alter berry maturation processes. For the time horizon 2100, as highlighted by a participant of WS4b: “*a nighttime temperature of 23°C during maturation, that’s hot*”.

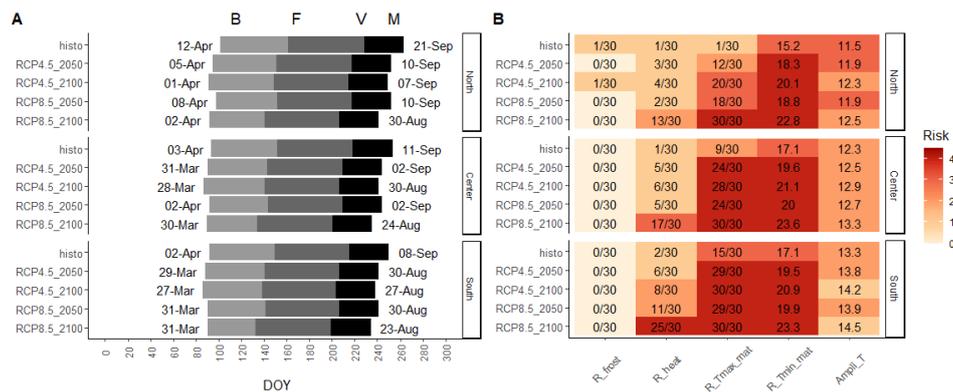


Figure 4.7 A) Simulated phenological stages (B: budburst, F: flowering, V: veraison, M: maturity) and B) associated risk indicators (R_) for yield quantity (frost, heat) and quality (ripening inhibition, fresh night, thermal amplitude), same units as in Table 4.4. Data are presented according to the three climatic areas (top: north, middle: center, bottom: south) in the historical period (1981-2010), and for two time horizons (2031-2060 and 2071-2100), according to RCP 4.5 and 8.5.

3.3.2 Irrigation needs and total grape production

Mean simulated irrigation requirements for the historical period are 21 mm per year (Table 4.5), which seemed low to stakeholders with respect to current practices: “*these are the requirements, not the inputs. You’d be surprised by the difference; the reality is more than 100 mm*”. In future climate scenarios, irrigation requirements increase by 62 to 85% at the horizon 2050 and are predicted to more than double by the end of the century in the RCP 8.5. The largest increases in water requirements occur during spring, although historical spring irrigation is almost nil. These predicted requirements, however, remain lower than the current practices estimated by local stakeholders.

Total grapevine production at watershed scale is expected to decrease from -5% to -11% by mid-century (Table 4.5). The decrease in production is relatively similar in RCP 4.5 for both time horizons (-5 to -7%), whereas the predicted decrease reaches -14% in RCP 8.5 for 2100. The type of production that undergoes the most important decrease is the PGI irrigated production, despite the increase in irrigation water supply. An explanation could be the irrigation thresholds that might be too low to maintain high yield under future climatic conditions. We expect that yield losses could be limited by higher irrigation levels. In any case, irrigated production represents a small part of the Rieutort grapevine production (< 20% in volume) and maintaining the production in those irrigated areas would not counteract the global drop of production at watershed scale. Stakeholders argued for “*a better sharing of water resources*” and defended the idea to “*consider other irrigation practices for high-quality production*” in order to reach the objective of limiting irrigation, while securing production.

Table 4.5 Irrigation requirements and grape production under future climatic conditions. PGI: protected geographic indication. PDO: protected designation of origin. RCP: Representative concentration pathway.

Indicators	1981-2010	2031-2060		2071-2100	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
<i>At field scale</i>					
Irrigation requirements (mm)	21	34 (+ 62%)	38 (+ 85%)	37 (+ 76%)	49 (+ 133%)
-Spring irrigation requirements (March to May)	3	11 (+ 267%)	10 (+ 233%)	10 (+ 233%)	14 (+ 367%)
-Summer irrigation requirements (June to Sept)	18	23 (+ 28%)	28 (+ 56%)	27(+ 50%)	35(+ 94%)
<i>At watershed scale</i>					
Total production (1000 hl)	111	105 (-5%)	99 (-11%)	103 (-7%)	95 (-14 %)
- PGI irrigated	20	17 (- 15%)	17 (- 15%)	16 (- 20%)	16 (- 20%)
- PGI non-irrigated	49	44 (- 10%)	42 (- 14%)	44 (- 10%)	41 (- 16%)
- PDO	42	43 (+ 2%)	40 (- 5%)	43 (+ 2%)	39 (- 7%)

3.3.3 Grapevine yield

During the historical period (1981-2010), lower yields (<5 t/ha) are found in the northern area with PDO production on superficial soil, while the highest productivity sectors (> 14 t/ha) are located in the southern and irrigated areas (Figure 4.8). These patterns showed a general agreement with stakeholders' perceptions. Projections show contrasted yield evolution according to the two RCPs. In RCP 4.5, modeled yields slightly increase in the northern sectors. This could be explained by two factors: the more pronounced advance in phenology that avoids drought periods after flowering period (critical period for bud fertility and berry number determination), and the higher summer rainfall amounts predicted in RCP 4.5 (Table 4.2) that refill soil water reserve more efficiently in superficial soils. In the other sectors, yields decrease by 10% in 2050 and 20% in 2100. In RCP 8.5, the yields in all sectors were predicted to decrease by 0 to 20 % in 2050 and as much as 30% for the southern sectors in 2100. The important yield decrease in the southern irrigated area could be explained by the particularly low annual rainfall amounts predicted with the RCP 8.5 scenario (< 530 mm). It is worth noting that the model could overestimate the yield decrease in the southernmost sector because it does not consider the presence of a groundwater table that could mitigate the vineyard water stress.

In reaction to these results, participants first highlighted the importance of changes in management practices, particularly in the southern areas (as compared to northern areas). For example, they suggested that *“better vigor management could limit the water loss by transpiration.”* Stakeholders from the northern area interpreted the predicted low decrease in their yield as *“good news”*, but pointed out that they *“must maintain a high economic return for their wine.”* Finally, the participants suggested broadening the range of evaluation indicators with further details on berry sugar accumulation (in relationship with the leaf/fruit ratio), and economical aspects at farm scale.

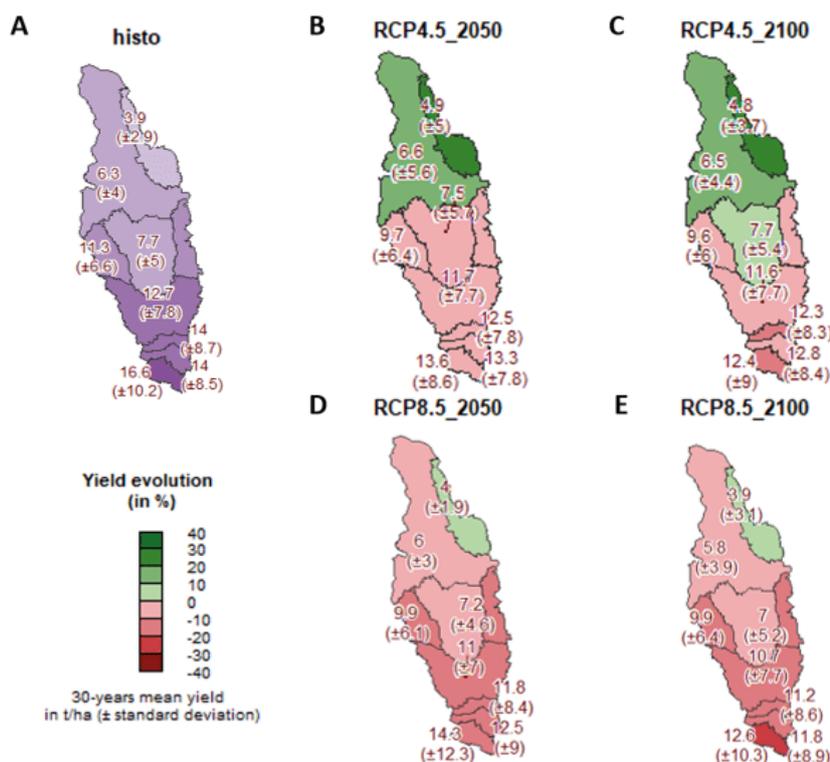


Figure 4.8 Mean yield evolution (and standard deviation) under two representative concentration pathways (RCP 4.5 in B and C, RCP 8.5 in D and E) scenario in historical period (1981-2010 in A), and two time horizons (2031-2060 in B and D and 2071-2100 in C and E).

4 Discussion

4.1 Model-based evaluation of climate change impacts

Dynamic models are often limited by the number of biophysical processes they consider and by the level of scientific knowledge about them. In our study, the crop model (i.e. the coupling of phenological, WaLIS and GraY models) relies mainly on the effect of temperature and water deficit on grapevine yield. Based on the results of Guilpart et al. (2014), we hypothesize that grape yield is limited by the number of sinks (clusters and berries) per plant, rather than by net assimilation. Consequently, our model does not include any effect of increasing CO₂ concentration in the atmosphere, omitting the positive effect it might have on photosynthesis, but this point needs to be further documented for perennial crops (Toreti et al., 2020). It should be noticed that until now, CO₂ enrichment of grapevines has been carried out with no limitation in water and nitrogen supplies, and only over the course of 2 to 3 years (Bindi et al., 2001; Moutinho-Pereira et al., 2009;

Wohlfahrt et al., 2019). However, studies looking at other perennial systems (forests, grassland) and longer time periods showed that when soil resources are limited, the effect of elevated CO₂ on productivity may be less certain (Reich and Hobbie, 2013). Similarly, our model did not include variety-specific responses of yield to water deficit. It is likely that such variability exists among the current grapevine varieties (Duchene, 2016), but it is difficult to infer stable parameter values from the available databases (Levin et al., 2020b). Despite these two simplifications, the WaLIS-GraY model was able to simulate grapevine yield with quality indicators similar to those in existing grapevine models found in the literature, such as UNIFI.GrapeML (Leolini et al., 2018) and STICS (Fraga et al., 2015).

Other model limitations are related to the availability and quality of the input data. Stakeholders highlighted two main limitations in the data used. First, although we distinguished three climatic areas thanks to the medium-resolution climate projection data (8 x 8 km), we did not take into account microclimatic effects, which are determinant factors of vulnerability and adaptation in small-region studies (Le Roux et al., 2017; Quénot et al., 2017; Tissot et al., 2017). Second, the estimation of soil water availability was based on isolated estimations. Even if experimental fields were chosen with stakeholders to represent soil conditions in the watershed, it is difficult to capture small-scale variations. These estimations of spatial variations could be improved by using high spatial resolution satellite and crowdsourcing data (Pichon et al., 2021), which are promising tools to improve the quality of the spatial representation of the soil parameters.

The present study quantitatively evaluates the impacts of climate change on grapevine phenology, irrigation needs, and grapevine yield. Regarding the phenology, our simulation shows clear advancement in the timing of each event, which is consistent with Fraga et al. (2016) in their study conducted at European scale. The more pronounced advancement at higher elevation corroborates the results of Caffarra and Eccel (2011). This may be related to a higher phenological sensitivity of mountain sites to climate change. Previous studies that simulated grapevine yields under future climatic conditions offer contradictory findings, in part because the model and data choices depend on the spatial scale. For example, our findings do not support previous research at the European scale that projected a yield increase in South of France for RCP 8.5 (STICS model in Fraga et al. (2016)). But we see similarities with a medium-scale study led in the Tuscany region (61, 000 ha vineyard in Italy) that predicted yields decreasing from 15 to 30 % by the end of the century (Moriondo et al., 2011). The comparison of those two studies shows how spatial scale and model choice, linked to different climate and soil data sets, is crucial. Nevertheless, those studies involved invariant plant material and cultivation practices (variety, planting

density, training system). Our study goes further by simulating different cropping systems according to their localization. Moreover, our findings suggest that the current diversity of practices is a way to limit grapevine vulnerability to climate change. The simulated irrigation water requirements are low compared to those reviewed by Naulleau et al. (2021). One reason for this could be that the irrigated areas are located in deep soils with a TTSW higher than 225 mm. In Mediterranean areas, grapevines are often cultivated in soils more prone to water stress (e.g. TTSW close to 100 mm in Gaudin and Gary (2012)). The main finding of this work is in agreement with Fraga et al. (2018); it suggests that the increased irrigation supply would not be sufficient to alleviate yield losses in irrigated areas.

4.2 Benefits and limitations of the participatory approach

While model-based evaluation of climate change impacts should be carried out with caution (due to various sources of uncertainty, Corbeels et al. (2018), they can be beneficial in a participatory approach to hybridize local and scientific knowledge and stimulate discussions. In this study, the early and frequent involvement of stakeholders was beneficial at multiple points in the modelling process: First, stakeholders actively helped at defining the representation of the baseline situation in the model. Information provided by generic datasets, commonly used by modelers (e.g. soil, cultivation practices) appeared too rough to represent the spatial variability in the studied landscape. As in Murgue et al. (2016), we found a compromise between case study spatial extent and level of details in the representation of cropping systems, although we reached a simpler representation than theirs. Nonetheless, the participatory mapping exercise significantly enhanced the representation of a common reference situation for grapevine landscape at pertinent scales and accomplished this relatively quickly. Second, as in Murgue et al. (2016), our participatory framework gave various occasions to explain and to update intermediary objects (conceptual scheme, baseline description, field-scale outputs, evaluation indicators) that evolved as the workshops progressed. Consequently, as in Leenhardt et al. (2012), the information and concepts shared between stakeholders and modelers were progressively assimilated and improved. These frequent interactions with stakeholders, together with the reciprocal sharing of data, could explain the higher level of trust in the model, and the stable participation rate.

However, several limitations to the participatory approach should be acknowledged. First, the workshop participants were primarily drawn from the viticulture sector and were thus focused on “grape production” objectives (the agro-environmental facilitators were also close to this sector, and the regional policymaker acted primarily as an observer).

Thus, we did not consider other important environmental and economic issues (e.g. other crop productions, water for human consumption, employment). We tried to enroll local and regional policy makers, with transversal skills (through interviews), but they decided to not participate to the workshops, although they “remained interested in the study results.” Indeed, the defined research problem was specific to the viticulture sector, and thus drew a specific audience. Second, modelers had difficulty taking account of certain processes that stakeholders highlighted as important. We can cite, among others, the effects of hedges and trees that can create a favorable microclimate for grapevines (Grimaldi, 2018), and processes linked to the evolution of pest pressure under a changing climate (Bois et al., 2017). Those two examples are difficult to include in a dynamic model because the underlying processes are complex and not well known. Processes to be considered are multi-factorial (climate, cultural practices, initial pest pressure, type of hedges, etc.); they require fine-scale data (topography, vegetation layers, humidity rate, etc.), and there are interactions between scales (from plant organs, grapevine canopy, field to landscape). Nonetheless, it is possible to include expert knowledge about these processes into other types of models (Voinov et al., 2018). Sacchelli et al. (2017) structured expert knowledge around climate change adaptation in Tuscany by using Cognitive Maps (semi-quantitative model) that allowed to detail all important concepts and the action/retroaction loops between them. Other model formalisms, such as the agent based models seen in Delay et al. (2015), are also based on expert knowledge to simulate dynamics at different spatial and temporal scales. However, such models are specific to the participants and the local conditions. Their uses and their results would probably be difficult to extrapolate to other areas. In our case, the watershed model remains generic and could be used to simulate other vineyards in the world, providing that necessary input data exist, and that grape yield is mainly limited by water. Our findings should certainly be able to be extrapolated to typical Mediterranean vineyards where coastal plains meet inland hills.

5 Conclusion

Combining modeling and participatory approaches remains challenging, especially in complex and uncertain contexts such as climate change issues. The present study was designed to implement a modeling approach that combines scientific and local knowledge to quantitatively evaluate the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. We illustrate how the interactions between stakeholders and modelers led to an original watershed model whose inputs were spatially defined by local stakeholders. The integrated evaluation of climate change impacts reveals the heterogeneity of those impacts on the watershed, in terms of local conditions (soil and climate) and grapevine production

systems. The entire territory would be impacted by high temperatures, increasing risks to production in both quantity and quality, but premium-wine production areas (PDO) would be less impacted than high-production areas (PGI). The stakeholders found the generated information on climate change impacts to be relevant, and in the next step, they will be involved in the design of local adaptation strategies.

Chapitre 5

How can wine-growers adapt to climate change? A participatory modeling approach in the South of France.

Ce chapitre présente les résultats de l'évaluation de stratégies d'adaptation construites collectivement avec les acteurs du bassin versant du Rieutort.

Suite à la présentation des impacts du changement climatique dans le bassin versant du Rieutort (Chapitre 4), les acteurs locaux et régionaux ont contribué à la construction de quatre stratégies d'adaptation au cours d'un premier atelier. Ces stratégies ont été évaluées avec le modèle présenté dans le Chapitre 4. Puis, les résultats ont été discutés au cours d'un second atelier. La discussion a permis de compléter l'évaluation avec des indicateurs économique (coût/bénéfice), technique (faisabilité) et social (souhaitabilité). Les résultats montrent que la stratégie visant à retarder les dates de vendanges n'a que peu d'effets sous climat futur. La stratégie visant à améliorer l'efficacité de l'eau permet de compenser les pertes de production à moyen terme, à l'échelle du bassin versant, à condition d'augmenter les surfaces irriguées et de mettre en place des adaptations innovantes (ombrage, réduction de densité). Ces leviers ne sont pas tous considérés comme faisables ou souhaitables. L'extension du vignoble permet de maintenir la production à l'échelle du bassin, sous l'hypothèse de la possibilité de remise en culture des surfaces abandonnées. Enfin, la stratégie visant à améliorer la qualité des sols pour améliorer la production n'a pas pu être évaluée quantitativement.

Ce chapitre est un projet d'article qui sera soumis à *Agricultural System* et dans lequel la référence (Naulleau et al., submitted) renvoie à l'article soumis à la revue EMS (Chapitre 4).

Highlights

- Adaptation strategies that spatially combine technical options in a Mediterranean watershed were designed through a participatory approach.
- Adaptation strategies were evaluated by integrated modeling and stakeholder's opinions (feasibility, desirability).
- A few adaptation strategies maintain total grapevine production in the watershed by the mid-century, but with spatial heterogeneity.
- Low-yield production sectors show higher adaptive capacity, while less impacted by climate change.
- Shared knowledge of model's results and local expertise enable to question the necessary information to adapt agricultural system to climate change.

Abstract

Context: Climate change threatens differently wine growing systems, due to the high diversity of viticultural landscapes. There is a need to design and assess adaptation strategies, that combine technical options in time and space so as to fit to the heterogeneity of local conditions.

Objective: We developed a participatory modeling approach to (1) design adaptation strategies in a viticultural watershed in the South of France, (2) numerically evaluate their effects under future climatic conditions, and (3) discuss these results with stakeholders.

Methods: We organized two sets of collective workshops, with in-between a modeling phase. A model was designed and used to evaluate the effects of six technical options, alone and in combination, at field and watershed scales (late varieties, irrigation, water saving by reducing canopy size, adjusting cover cropping, reducing density, and shading) as well as vineyard relocation. Model-based evaluation was followed by stakeholders' discussion. The cost-effectiveness of adaptation strategies was estimated at farm scale.

Results and conclusions: We co-designed four adaptation strategies that we evaluated under the high-emissions climate change scenario RCP 8.5. Delay harvest strategy with late varieties showed little effects on harvest dates and temperature during ripening. Water saving strategy would compensate for production losses if disruptive adaptations (e.g. reduced density) were adopted, and more land got access to irrigation. Relocation strategy would foster high premium wine production in the constrained mountainous areas where grapevine is less impacted by climate change. Soil improvement strategy was not evaluated in the model due to the lack of data and knowledge on soil related processes.

Significance: In future research, the shared evaluation between researchers and stakeholders would help to fill knowledge gaps that we identified like the effects of extreme

events and farm scale impacts of climate change.

Keywords: adaptation strategy, climate change, grapevine, landscape model, participatory design, water-saving practices

1 Introduction

In Mediterranean areas, wine-growers face great challenges due to climate change, which results in an increase in air temperature and a decrease in rainfall especially during spring and summer (Ferrise et al., 2016). Higher temperatures shift berry ripening towards warmer temperature conditions, and an enhanced water stress alters yield and berry attributes (Fraga et al., 2016). There is an urgent need for local and effective adaptation measures in response to climate change (Cradock-Henry and Frame, 2021).

Adaptation is defined as *“the process of adjustment to actual or expected climate and its effects. In human systems, adaptation seeks to moderate or avoid harm or exploit beneficial opportunities”* (IPCC, 2015). From a biophysical perspective, many adaptation measures are available (Haasnoot et al., 2020). In viticulture for example, irrigation and water saving techniques, varietal selection, and even vineyard relocation may contribute to adapt to climate change (Santos et al., 2020). However, the potential of those adaptation measures, alone or in combination, is not yet fully investigated (Naulleau et al., 2021). Moreover, the spatial diversity of viticultural landscapes has been poorly integrated into adaptation studies, although spatial factors (e.g. soil, altitude, slope, water access) determine levers and barriers to the implementation of adaptations measures, and the adaptation performances at several scales (Neethling et al., 2019). There is a need to design and assess adaptation strategies, here defined as combinations in time and space of technical options fitted to heterogeneous local conditions within a landscape.

In viticulture, adaptation strategies have already been proposed and assessed by researchers alone, or in interaction with stakeholders. In the first option, simulations realized at national scale with the STICS crop model explored irrigation (Fraga et al., 2018), or mulching-based strategies (Fraga and Santos, 2018). The analysis of agroclimatic indicators also allowed to design and evaluate vineyard migration scenarios at European (Malheiro et al., 2010) and worldwide scales (Hannah et al., 2013). While those strategies benefit from a quantitative evaluation, their main drawback is the insufficient consideration of local context and stakeholder’s capacity to implement multi-measures adaptation strategies (van Leeuwen et al., 2013). In contrast, others studies involved stakeholders in the design of adaptation strategies. Stakeholders were engaged through in-depth interviews (e.g. Lereboullet et al. 2013a; Neethling et al. 2017; Nicholas and

Durham 2012), online surveys (e.g. Dunn et al. 2015) or collective workshops (e.g. Aigrain et al. 2016), to share their perception on climate change issues, and their adaptation possibilities and constraints. Participatory approaches embrace various scales from field, to farm and to regional scales. Resulting strategies may combine short and long term adaptations, also called tactical and strategic options (e.g. Dunn et al. 2015; Lereboullet et al. 2013a), reactive and anticipatory options (e.g. Neethling et al. 2017; Nicholas and Durham 2012), and individual and collective responses (e.g. Lereboullet et al. 2013a). Those strategies exploit the multi-functionality of agricultural landscapes to adapt to climate change (Bardsley et al., 2018). However, further works are needed to numerically evaluate the potential of those co-designed adaptive strategies, and thus help decision making from plot, to farm, and to region scales (Mosedale et al., 2016; Nicholas and Durham, 2012). No previous study has developed approaches that combine participatory design of strategies with a model-based evaluation in a context of climate change (Naulleau et al., 2021).

Participatory modeling offers a wide range of tools and methods to engage stakeholders into modeling processes (Voinov et al., 2018). Among them, process-based models are particularly suitable to visualize and analyze complex systems, confronted with a combination of climatic factors (e.g., temperature, evaporative demand, rainfall amounts) and management options (e.g., variety, canopy management, water management). However, the use of process-based models in participatory approaches remains difficult because of model complexity that results in difficulties to perform a realistic parametrization (data requirement) and to communicate around the model (assumptions, simplifications) and its results (large number of variables and data). Nevertheless, finding the balance between complexity and communication of information about climate change is crucial to reach a shared understanding of its the local impacts and of the potential of adaptation strategies.

In this study, we aimed at designing, with stakeholders, and numerically evaluating strategies of adaptation to climate change, considering field, farm and watershed scales. We hypothesized that the involvement of stakeholders to explore spatial and temporal combinations of adaptation measures would help at identifying leeway to adapt grapevine systems to future climatic conditions. The case study was located in the Rieutort watershed, a typical Mediterranean vineyard watershed of 45 km², where previous works were dedicated to the co-development of a numerical model (conceptualization, and model testing in reference situation) and the co-evaluation of site-specific impacts of climate change with local and regional stakeholders (Naulleau et al., submitted). In this paper, we mobilized stakeholders to (i) design adaptation strategies we could model, (ii) discuss simulation results, (iii) enlarge discussion to other adaptations.

2 Material and methods

2.1 A participatory modeling process in a viticultural watershed

The case study was located in the South of France, under a Mediterranean climate, in a heterogeneous vineyard of 1,400 ha. The Rieutort watershed was divided into eight production sectors (Figure 5.1A), according to the soils, modes of production (i.e. low yield objective in Protected Designation of Origin (PDO) areas, high yield objective in Protected Geographical Indication (PGI) areas), and where irrigation water is available or not (Naulleau et al., submitted).

To design and assess adaptation strategies, we organized two sets of participatory workshops, with in-between a modeling phase (Figure 5.1B). Each set of workshops included two workshops, that were conducted with two different groups: local stakeholders (wine-growers, representatives of cooperative cellar and PDO syndicates, technical advisors and agro-environmental coordinator) and regional stakeholders (extension and advisory services, and regional policy makers). We hypothesized that regional stakeholders would bring more extreme strategies, while local stakeholders would bring more restricted but locally adapted strategies based on the exploitation of current diversity and constraints, as argued in March et al. (2012). Five regional stakeholders participated to the two regional workshops. Nine, then six local stakeholders participated to the two local workshops. The first set of workshops (WS1) were aimed at designing the adaptation strategies, that consist in the spatial distribution of adaptation measures in the watershed. Intermediary meetings and interviews with participants were held during the modeling phase to ensure modeler's choices, and share complementary needed information. The second set of workshops (WS2) consisted in the presentation and discussion of simulation results.

The model used to simulate the co-designed adaptation strategies was developed in a participatory way (Naulleau et al., submitted) with the same stakeholders. It couples phenological, water balance, yield formation and hydrological modules (Figure 5.1A), and is implemented into the landscape modeling platform OpenFLUID (Fabre et al., 2013). It simulates the daily spatiotemporal dynamics of water fluxes and grapevine production at field level within the landscape considering (i) the spatial variability of soils and climate, and (ii) the diversity of cropping systems (i.e. grapevine varieties, planting density, bud load, etc.). The model is able to simulate the impacts of six adaptation measures: irrigation, reduced canopy, late ripening varieties, reduced density, cover crop management, and shading. The model provided output indicators at field and watershed scales (phenological stages, temperature conditions during critical phases, irrigation needs, yield) that were co-designed with stakeholders. Indicators at farm scale were deduced from

model simulations (see section 2.3).

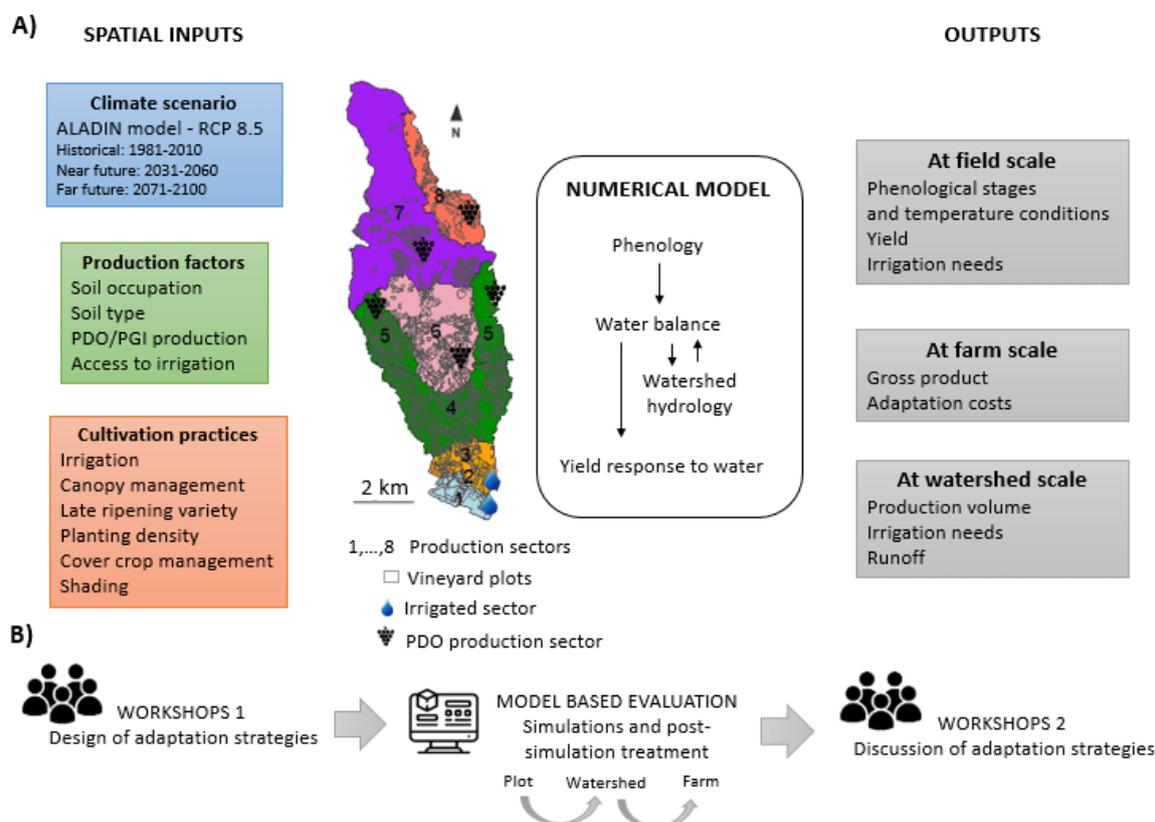


Figure 5.1 Description of the numerical model (A) and summary of the workflow (B) followed with stakeholders to design and assess climate change adaptation strategies in the Rieutort watershed. The eight production sectors are described in Appendix H - Suppl table 1. PDO: Protected Designation of Origin, PGI: Protected Geographical Indication. RCP: Representative Concentration Pathways.

2.2 Designing adaptation strategies

Based on the discussion of climate change impacts in the Rieutort watershed in the reference situation (see details in Naulleau et al., submitted), a participatory mapping exercise was devoted to the design of adaptation strategies. The strategies were designed by positioning the different adaptation measures on a map of the watershed. Debates between participants during the activity were recorded. The expected results were spatial combinations of adaptation measures according to explicit location factors.

During the workshops, stakeholders examined the six adaptation measures that the model can simulate, indicating where they would position them or not according to several factors (soils, type of production, magnitude of the climate change impacts). They did

not consider economic feasibility to position the adaptation measures, except for the extension of the irrigated areas. However, it is worthy notice that, at the end of the two workshops, researchers faced three limitations. First, some adaptation measures were not precisely located within the production sectors (reduced density and shading). The researchers used location rules based on the grape variety on which the adaptation measure would be applied in priority. Second, adaptation measures were not clearly organized into delimited adaptation strategies. Thus, researchers used the recorded discussions and annotated maps and chose to delimitate the salient adaptation strategies that combine the adaptations measures according to their order of appearance during the workshop. The delimited strategies included non-simulated adaptation measures, as the discussion raised more than the six simulated adaptation measures. Third, the exact modalities for each adaptation measure (i.e. intensity of canopy reduction, timing of cover crop destruction, surfaces with cover crop, shading time and effects) were either not precise or too numerous to be simulated (calculation time, analysis difficulties and easiness to communicate to stakeholders). Thus, researchers proposed to stakeholders to start the simulations phase at plot scale in order to identify the model parameters (i.e. the modalities) that matched with current literature or expertise (impacts on phenology, yield and irrigation requirement).

2.3 Model simulations and post-simulation calculations

The model-based evaluation was three-fold. A first step was dedicated to the exploration of the performances of simulated adaptation measures at plot scale, according to a large range of parameters. A second step was dedicated to the simulation at watershed scale of the adaptation strategies defined in the WS1, using the parameters determined at plot scale. The third step consisted in the calculation of a farm-scale indicator, proposed by stakeholders, to evaluate the cost-effectiveness of the adaptation strategies.

In the first step, for the simulations at field scale, we started to create a ‘typical case sampling’ of plots in the watershed. We used a criterion-based sampling (Ritchie et al., 2003) to select one representative plot per production sector (Figure 5.1). Each adaptation was simulated individually in the plots according to the rules presented in Table 5.1 (location, value ranges). Some of these rules were fully described by stakeholders (e.g. reduced density), other were partially described and had to be supplemented by information from the scientific and grey literature (e.g. shading, cover crop management). On each plot, simulations were conducted for the three types of varieties (early, mid, late-ripening varieties) and the results were expressed as their weighted average, using the proportions of the varieties observed in the corresponding production sector (Appendix H - Suppl table 1).

Table 5.1 Detailed simulation of adaptation measures at plot scale, with information sources. If pre-existing parameters in the baseline, the reference value is indicated into parenthesis (*)

Adaptation	Parameters changed	Production sectors	Values	Sources
Irrigation	Irrigation dose	1, 2, 4, 5, 6, 7	10 mm (20 mm the first supply)	Stakeholders
	Soil water content threshold	1, 2, 4 (PGI)	21% between budburst and flowering 12% between flowering and mid-flowering-veraison 7% between mid-flowering-veraison and veraison 4% between veraison and maturity	
	Annual maximal supply	5, 6, 7 (PDO)	12% between budburst and flowering 7% between flowering and mid-flowering-veraison 4% between mid-flowering-veraison and veraison 3% between veraison and maturity	(Ojeda, 2007)
		1, 2 (irrigated network) 4,5 (network extension) 6,7 (Hill reservoir)	Unlimited 80 mm 50 mm	Stakeholders
Late ripening variety	Chilling and forcing	All the sectors	Appendix H - Suppl Table 2	(Morales-Castilla et al., 2020)
Late ripening composite ^a	units requirement	All the sectors		
Reduced canopy	Crop coefficient (* between 0.40 to 0.62)	All the sectors	-10 cm height: 0.36 to 0.58	(Riou et al., 1989)
		1 to 6 (* 4500 plants/ha) 7, 8 (* 4000 plants/ha)	-20 cm height: 0.33 to 0.53 4000 plants/ha 3300 plants/ha	Stakeholders
Shading	Shading time ET0	All the sectors	From veraison to maturity	Stakeholders + (Caravia et al., 2016)
		All the sectors	- 60% global radiation - 2°C on daily maximal temperature >35°C	
Cover crop management	Destruction date (* fixed date) Surface covered during summer	All the sectors	at budburst at flowering	Stakeholders + (Fernández-Mena et al., 2021)
		All the sectors	1 inter-row out of 4 1 inter-row out of 2 All inter-rows All rows and inter-rows	

^ahypothetical extremely late variety, built by combining information on several late-ripening varieties to represent the later maturation exhibited by very late varieties (Morales-Castilla et al., 2020)

The second step consisted in testing spatial and temporal combinations of adaptation measures within the watershed. For each co-designed strategy, we simulated one or several combinations of adaptations measures. For adaptations requiring high investment costs (irrigation, shading nets) or replantation (late variety, density reduction), the adaptation measures were applied to a limited surface of the production sectors. Irrigation was limited to the planned irrigated areas, shading nets were introduced to the early-ripening (considered as more vulnerable), and reduced density was applied to the late-ripening variety (considered as more adapted to traditional low-density systems). Changes in soil occupation was also considered as another adaptation measure at watershed scale. Relocation of vineyards was based on the observation of past agricultural areas. To that end, past aerial black-and-white photograph were taken from IGN database (year 1974) and processed to obtain orthophotos at sub-meter resolution following Vinatier and Arnaiz (2018). Orthophotos were then classified in five classes (arable lands, orchards, vineyards, forests, and moors) using a Deep Learning algorithm trained on a sample covering approximately 600 plots, with an accuracy of 0.8 (Kappa Index).

A third step consisted in a post-simulation treatment of model outputs at farm scale. This scale was highlighted during WS1 as mandatory to be considered by some local stakeholders. We thus met with these stakeholders (one PDO representative and one agro-environmental coordinator) to identify representative farms and develop a farm-scale indicator that could be calculated from the modeling results. First, we selected farms having most of their vineyards in the watershed. Among the 59 farms that are registered in the French land parcel identification system (RPG 2017) and have at least one plot in the watershed, we selected the ones having more than 85% of their surfaces into the watershed. This initial sample included 18 farms. We verified that the distribution of farm surfaces in this sample was similar to that of the 59 farms sample (Appendix H - Suppl fig 1). Within this sample, we selected during the meeting, eight farms that represent the farms diversity in the watershed. Then we build an indicator (NecPrice) that represent the necessary wine selling price to balance the climate change impacts on yield and adaptation costs, i.e., maintaining the historical gross product ($GP_{\text{historical}}$). We assumed that the production costs were constant over time. We used as reference the mean price on the bulk market in 2020 ($P_{\text{historical}}$) communicated by the joint trade Council of the wines of Languedoc (CIVL).

$$NecPrice = \frac{GP_{\text{historical}}}{GP} * P_{\text{historical}} \quad (5.1)$$

Where for each farm $GP = \sum_p [(Y_p * S_p - C_p) * P_p]$

With for each plot of the farm p ,

Y_p : yield (in hl/ha),

S_p : surfaces (in ha),

P_p : prices (in €/hl) varying according to production type,

C_p : sum of adaptation cost implemented in the plot p (in €/ha).

Adaptation costs (Table 5.2) includes material and labor for annual operations (trimming, tillage, irrigation maintenance), and investment costs (irrigation infrastructure, shade nets). We also considered cost savings permitted by density reduction. We did not consider the cost linked to the implementation of vineyard, as we considered the vine renewing cost as inherent to the farm functioning and not specifically linked to the adaptation. Adaptation costs for material and labor were taken from Roby et al. (2008) and incremented by 15% to account for inflation over the 2008-2019 period, as proposed by Van Leeuwen et al. (2019). Investment costs were communicated by the regional stakeholders. The total costs of adaptation over the 30-years simulations were divided by 30 to obtain an annualized cost per hectare.

Table 5.2 Adaptation costs per hectare and per year

Adaptation	Cost (€/ha/year)	Source
Irrigation – Actual network	350	Regional stakeholders
Irrigation – Network extension	500 – 600	Regional stakeholders
Irrigation – Hill reservoir	600 - 850	Regional stakeholders
Shading nets	500 – 700	Regional stakeholders
Reduced density	-700 to – 1000	(Roby et al., 2008)
Tillage cost (cover crop management)	50 to 60	(Roby et al., 2008)
Trimming cost (reduced canopy)	50 to 70	(Roby et al., 2008)
Late ripening variety	0	
Relocation	0	

2.4 Discussion of the adaptation strategies with stakeholders

The study ended with a second set of four-hour workshops, with six local and five regional stakeholders, respectively. The aim was to present and discuss the numerical evaluation of adaptation strategies at field, watershed and farm scales. After a brief reminder of climate change impacts and model ability to simulate adaptations measures, researchers presented model outputs at field scale for the 2031-2060 and 2071-2100 periods. These outputs were expressed as the difference in harvest date, temperature during ripening, irrigation need and yield, compared to the reference situation during the historical period (1981-2010). We also evaluated the level of confidence in model's results, by estimating their similarities and divergences with scientific and grey literature results.

Stakeholders were then asked to complete the adaptation evaluation by estimating separately the feasibility and the desirability of the six simulated adaptation measures, to which we added the non-simulated measures mentioned at early stages of the study (Naulleau et al., submitted). The latter included drought-tolerant varieties, high quality rootstocks, water-efficient training systems, soil quality improvement, east-west row orientations and introduction of hedges. Stakeholders had seven green stickers to designate the most feasible or desirable measures, and seven red stickers to designate the less feasible or desirable measures. There was no obligation to place all the stickers. Stakeholders were asked to explicit their choice during collective discussion. After the workshops, we calculated a score (S) for each adaptation (a) and group of stakeholders (g). For each criteria c (feasible/unfeasible, desirable/undesirable):

$$S_{c,g,a} = \frac{N_{i=c,j=g,k=a}}{\max_{i=c,j=g}(N_{i,j,k})} * \max_{j=g}(N_{i,j,k}) \quad (5.2)$$

With,

$N_{i,j,k}$: number of stickers for the criteria c, the group g and the adaptation k
 $\max_{j=g}(N_{i,j,k})$ was 5 in both groups.

Then, the researchers presented the designed adaptation strategies at watershed scale and the simulation results for the RCP 8.5 climate scenario for the periods 2031-2060 and 2071-2100. Finally, the researchers presented, at farm scale, the range of NecPrice indicators evolution by the mid-century time horizon. At each stage of the presentation, stakeholders were asked to share their analysis on the simulations, and other strategies they could further imagine.

3 Results

3.1 Adaptation measures at field scale

3.1.1 Model-based evaluation and discussion with stakeholders

The performances of the six simulated adaptation measures at field scale under the RCP 8.5 climate change scenario were evaluated according to their impacts on harvest dates, mean temperatures during ripening, irrigation needs and yields (Figure 5.2). Irrigation compensated for yield losses due to climate change in most of the cases, with a high level of confidence in model results. The yield losses in irrigated PGI production were probably overestimated due to the presence of a shallow water table that could provide water to the grapevine roots, but was not considered in the model. Average irrigation

needs for PGI productions were multiplied by 2.5 for the mid-century horizon, and by 3.3 for the end-century horizon (from 11 in historical period to 37 mm/year). PDO productions are historically not irrigated in the studied areas. However, simulations showed an average irrigation needs of 27 mm/year during the historical period that kept relatively stable under future climatic conditions (up to 34 mm/year at the end of the century). Regional stakeholders confirmed that vineyard water balance is currently in deficit in PDO production areas. They highlighted that the *“positive effect of irrigation in reducing mortality in superficial soils”* was not modeled. Local stakeholders reminded that irrigation needs are highly variable over the years, especially for irrigation based on water ponds: *“high needs would coincide with dry years, we are not sure to fill the water reservoir those years”*.

The conversion of the whole plot into late ripening varieties instead of current representative varieties would limit harvest advancement by one week, which is little compared to the three weeks advancement predicted by the end of the century. Furthermore, the limited harvest date advancement almost did not impact the mean temperatures during ripening (-0.4°C for the 1971-2100 period). Conversely, it delayed the flowering period during warmer conditions, that could also adversely affect yield. The simulations with the hypothetical late ripening composite compensated for the three week advancement of harvest, even though temperatures during ripening remained higher than in historical period. This variety corresponds to a non-existent variety whose budburst would occur in end of April and maturity in October under historical climate, that raised many astonishments into the local stakeholder’s assembly: *“That would mean that we should prune between mid-Mars to mid-April, that would be impossible for worktime reason”*. Regional stakeholders were more motivated to seek similar varieties among the ancient or foreign varieties.

The three water saving adaptation measures (shading, reduced canopy and reduced density) showed positive effects on yield and irrigation needs (Figure 5.2). The reduction of canopy height and plant density compensated for the effects of climate change by limiting water stress thanks to a reduction of transpiring surfaces. Yet regional stakeholders were concerned that it could lead to an unbalance between vegetative and generative growth. The results on shading systems seemed realistic to the regional stakeholders, with a slight offset of climate change impacts on yield. Local stakeholders recognized the positive effects of those three adaptation measures on yield and irrigation needs but emphasized that they would also have impacts on the berry attributes at harvest (alcohol degree, acidity) that should be estimated. They specified also that density reduction and shading nets would require changes in the PDO specifications.

The model considered only the effects of cover crop on water budget (soil infiltration and water competition). Simulations showed that in average, keeping soil cover during summer decreased yield. However, the yield losses remained low (<5%) for sectors 1 and 2 with the highest available soil water capacity (data not shown), while requiring a mean supplementary irrigation of 5 to 10 mm/year. Local stakeholder noticed that grapevine systems would benefit of other services provided by cover crops, e.g. soil physical properties, microclimate, etc., that were not evaluated in this study. Both groups promoted the “development of a more flexible date of cover crop destruction” in order to maximize beneficial effects of cover crop while minimizing its impacts on yield.

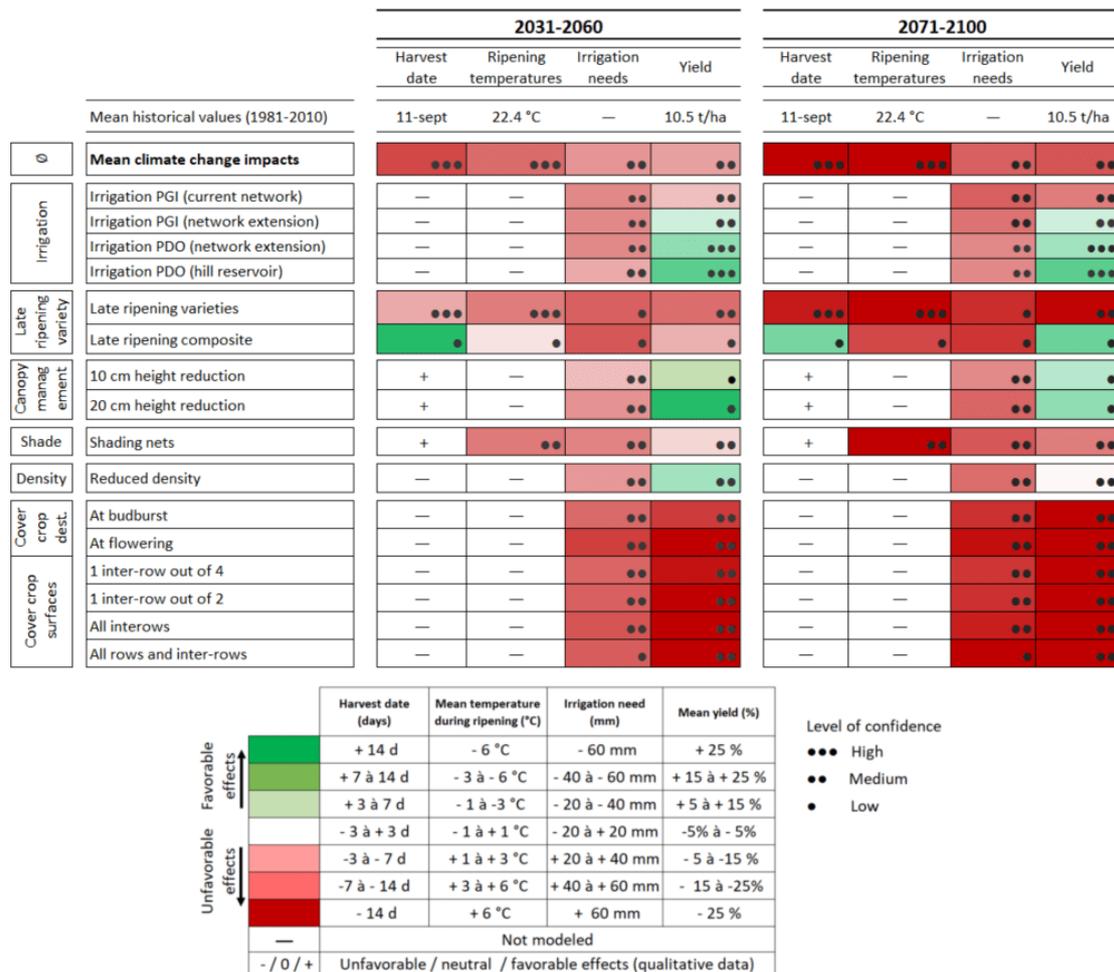


Figure 5.2 Simulated effects of adaptation measures on harvest dates, mean temperatures during ripening, irrigation needs and yields, comparing to historical values. Results were averaged for the eight representative plots of the Rieutort watershed for RCP 8.5 and two time periods: 2031-2060 and 2071-2100. Colors indicated the magnitude of the effects. Number of points indicates the level of confidence into model’s results (● : low, ●● : medium and ●●● : high). PDO: Protected designation of Origin, PGI: Protected geographical indication production.

3.1.2 Feasibility and desirability of adaptation measures

The most desirable adaptation measures (score > 4) according to local stakeholders were vigor control and soil quality (maximal score in Figure 5.3A). They also highlighted a large number of desirable measures (score between 2 to 3): water-efficient training systems, reduced density, and drought tolerant varieties and rootstocks. In total, they identified ten measures as desirable (score > 1). In comparison, regional stakeholders identified a limited number of desirable adaptation measures, among which vigor control did not appear, but the adaptive management of cover crop was mentioned. The desirability of some adaptation measures was subjected to debate in the local group, i.e. shading nets, hedges and irrigation.

The most feasible adaptation measures differed between the two groups (Figure 5.3B). Local stakeholders identified vigor control as the most feasible adaptation especially in the south of the watershed, while regional stakeholders identified the adaptive management of cover crop as most feasible. Then, both groups detailed feasible adaptation measures to improve the soil quality (increased fallow length, avoid compacting, increase organic fertilization), and water-efficient training systems. Irrigation was considered as feasible or unfeasible according to the ease of access to water. Planting drought tolerant varieties were considered as unfeasible by both groups mainly because they do not exist yet.

The comparison between desirability and feasibility showed interesting results. Some measures were desirable but not feasible: drought tolerant variety and rootstock. Those two measures appeared as priority for further researches. Other adaptation measures were feasible but their desirability was discussed: irrigation and late ripening varieties. Indeed, irrigation remained feasible in some areas depending on economic investment, but it set off risks of dependence on water resources. The low potential of late ripening varieties to delay harvest, as well as the labor constraints were the causes of the lower desirability of this adaptation measure for both groups. Some adaptation measures appeared neither feasible nor desirable: shading nets and hedges. Despite their beneficial effects recognized by stakeholders, those adaptation measures were described as difficult to implement (i.e. hedges), expensive (i.e. shading nets) or detrimental to the appearance of the landscape (shading nets). At last, vigor control, soil quality, row orientation, training systems and reduced density were identified as promising as they are both feasible and desirable.

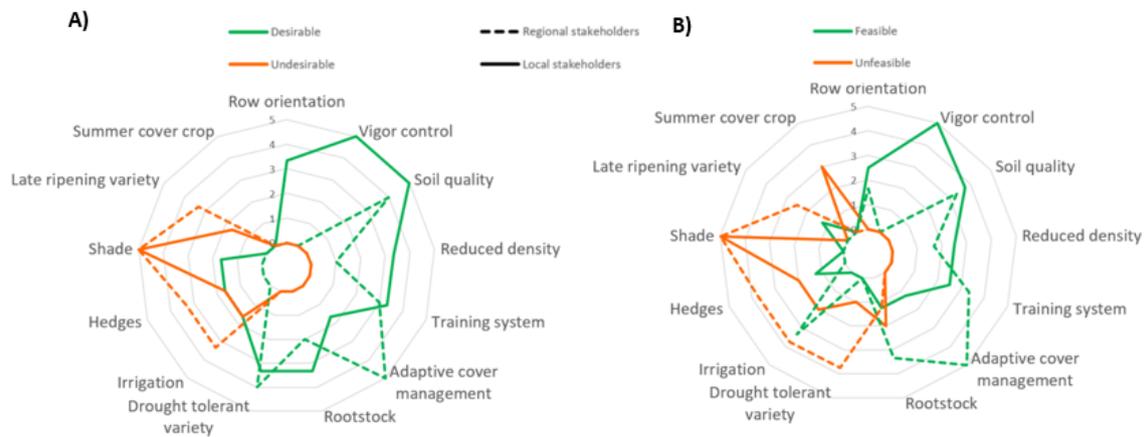


Figure 5.3 (A) Desirability and undesirability and (B) feasibility and unfeasibility of adaptation measures, according to local and regional stakeholders.

3.2 Adaptation strategies at watershed scale

3.2.1 Overview of the co-designed adaptation strategies

The *baseline strategy* considered the current production systems, without management changes to adapt to climate change. Based on the recorded discussions and maps from the first workshops, four adaptation strategies were designed (Table 5.3). We describe here the adaptation measures that compose each strategy and their implementation in the model:

- *Late harvest strategy*: the whole surface of the watershed is replanted with late-ripening variety to prevent the berry ripening from occurring during the warmer periods. No simulation at watershed scale was performed, as the results at plot scale showed little leeway on reducing the temperatures during ripening (see section 3.1.1).
- *Water saving strategy (WSS)*: water-saving practices are implemented with the aim to maintain the production volume, while enhancing water use efficiency. In the simulations, the strategy was declined into three gradual steps according to the adaptation measures implemented (Table XXX). The irrigated areas were extended as currently planned in the watershed (WSS_irri). Short term adaptation measures (reduced canopy and cover crop one inter-row out of four) were implemented in the Southern sectors of the watershed (WSS_ST), where local stakeholders pointed out their relevance during WS1 (Table 3). Long-term adaptation measures were considered in limited surfaces (WSS_LT), as they require replantation or high investments (Table 5.4). Shading systems were

simulated in all production sectors primarily on early ripening variety, while density reduction concerned the late-ripening varieties of the northern areas.

- *Soil improvement strategy*: The combination of soil management practices with high-quality rootstock are implemented in order to improve soil available water capacity and deep rooting of grapevine. The lack of knowledge about the soil heterogeneity in the watershed as well as the physical and biological processes occurring in the soil compartment did not allow us to evaluate quantitatively the performance of this soil improvement strategy.
- *Relocation strategy (RelocS)*: the vineyard extends northwards, given the aptitude of northern vine systems to withstand climate change (Naulleau et al, submitted). The main limitation to evaluate this strategy is the lack of data on soil characterization, especially on the northern shale soils. Therefore, we hypothesized that all the surfaces that were cultivated with vine in 1974 could be converted back into vineyard to compensate for the production losses due to climate change.

Table 5.3 Combination of adaptation measures in the four co-designed strategies (irri : irrigation ST : short term, LT : long term). X : simulated and • : non-simulated

Adaptation measures	<i>Late harvest strategy</i>	<i>Water saving strategy</i>			<i>Soil improvement strategy</i>	<i>Relocation strategy</i>
		<i>Irri</i>	<i>ST</i>	<i>LT</i>		
Late ripening variety	X					
Irrigation		X	X	X		X
Reduced canopy			X	X		
Summer cover crop			X	X		
Reduced density				X		
Shading	•			X		
Hedges	•					
East-west row orientation	•					
Drought tolerant variety				•		
High quality rootstock					•	
Water efficient training system				•		
Soil quality*					•	
Relocation						X

* increased fallow length, good soil preparation before planting, organic fertilization, mycorrhiza, and limitation of irrigation the first years after planting

Table 5.4 Percentage of the sector surfaces engaged into adaptation for the three water saving strategies (WSS): irrigation where it is possible (irri), short term adaptation measures (ST) and long term adaptation measures (LT). * 1 inter row out of 4

Sector (vineyard surface)	WSS_irri	WSS_ST		WSS_LT	
	Irrigation	Reduced canopy	Summer cover crop*	Reduced density	Shading nets
1 (94 ha)	100%	100%	100%		20%
2 (77 ha)	100%	100%	100%		11%
3 (108 ha)		100%	6%		17%
4 (400 ha)	8%	100%	2%		20%
5 (173 ha)	32%		1%		39%
6 (278 ha)	46%		6%		46%
7 (205 ha)	30%			31%	40%
8 (84 ha)				61%	29%
Watershed (1418 ha)	31%	48%	14%	8%	31%

3.2.2 Impacts of water saving strategy (WSS) to enhance water use efficiency

The production sectors 4, 5, 6 and 7 were newly and partially irrigated into the water-saving strategy. Mean irrigation needs in the newly irrigated sectors were lower than for the currently irrigated sectors (Figure 5.4A). It can be explained by the annual maximal supply imposed by a collective management of the water resources, and by the lower water requirement of PDO production compared to PGI production. In sector 6, where the limestone soils are superficial and the planting density is 4,500 plants/ha, the maximal water supply were required 1 year out of 4 in the period 2071-2100, which probably implies frequent difficulties to satisfy grapevine water demand. The multiplication by three of the irrigated surfaces (WSS_irri) resulted in the doubling of irrigation water requirement at watershed scale (from 68,000 m³ to 134,000 m³ for the period 2031-2060, Figure 5.4B). The short-term (WSS_ST) and long-term (WSS_LT) did not reduce significantly water irrigation needs, neither at field scale nor at watershed scale.

The mean yields in the newly irrigated surfaces were maintained, and even increased compared to the historical period (Figure 5.5A). Short term adaptation strategy (WSS_ST) showed a positive effect on yield in the two non-irrigated sectors in the south of the watershed (sector 3 and 4), allowing to reach the objective yield of 12 t/ha. Long term adaptation strategy (WSS_LT) restored yield, up to the historical level, in the northern sectors in the two time periods, thanks to the combined effects of shading nets and reduced density. Shading nets also limited the yield decrease in the center sectors. This effect was visible only for the 2031-2060 period. At watershed scale, only the mobilization of irrigation, short- and long-term adaptation measures in the watershed compensated

for the production losses due to climate change, and this only at a near future horizon (Figure 5.5B). Production losses by the end of the century in the WSS_LT strategy were estimated at 6%, instead of 14% in the baseline strategy. PGI production suffered the highest losses. However, the mean yield in PGI production in sectors (1 to 4) remained higher than the authorized yield of 12 t/ha, while the mean yield in sector 8 remained below the authorized yield in PDO production fixed at 6 t/ha.

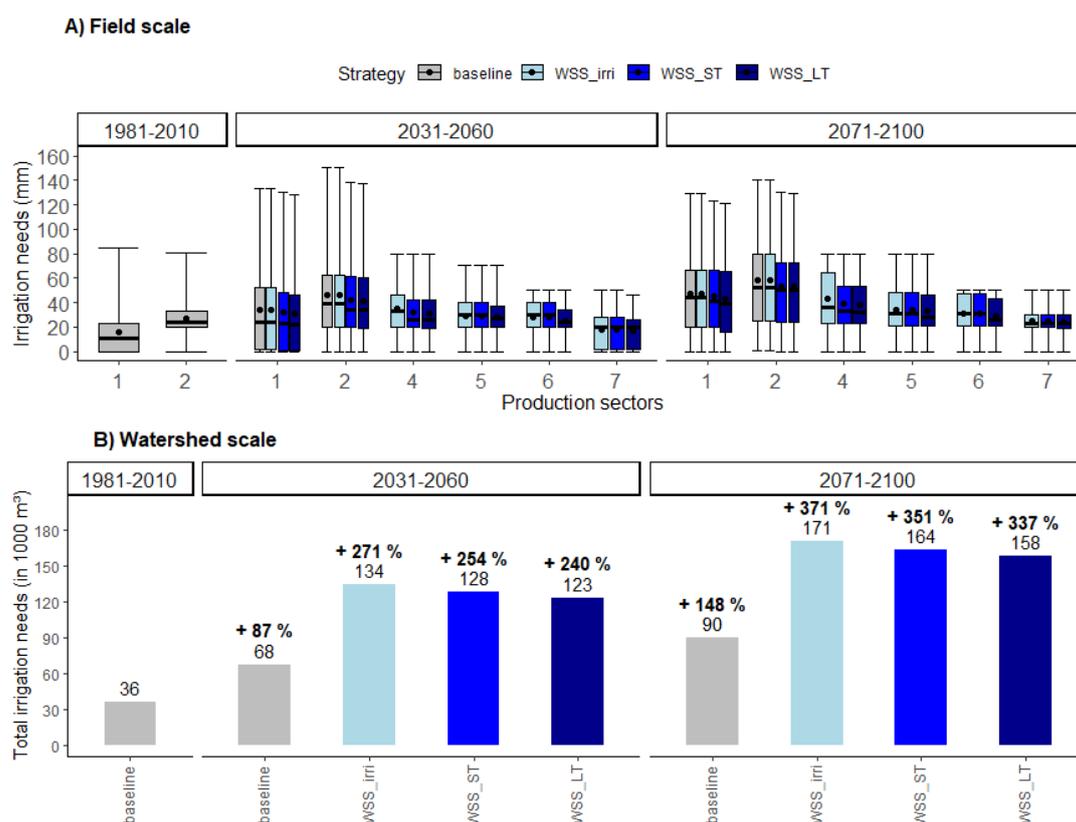


Figure 5.4 Annual irrigation needs at (A) field and (B) watershed scale, according to the three degrees of water saving strategies (WSS) in RCP 8.5. Boxplots correspond to the 30 years of simulation (with mean indicated by a point). Barplots correspond to the mean irrigation need, with difference in percentage with the baseline strategy in historical period. Sector 3 and 8 are not planned to be irrigated.

Local stakeholders suggested to go further in the long-term adaptation strategy, by simulating an extreme strategy where all the vineyard surfaces would be shaded and with reduced density. Behind the reduction of production losses presented in Figure 5.5B, the regional stakeholders also highlighted that the water-saving strategy, based on parsimonious development of irrigation, remained unequal among wine growers. Indeed, production, especially in PDO sectors, was maintained because few wine-growers got access to irrigation. But for the others, it would still imply production losses and thus revenue losses due to climate change.

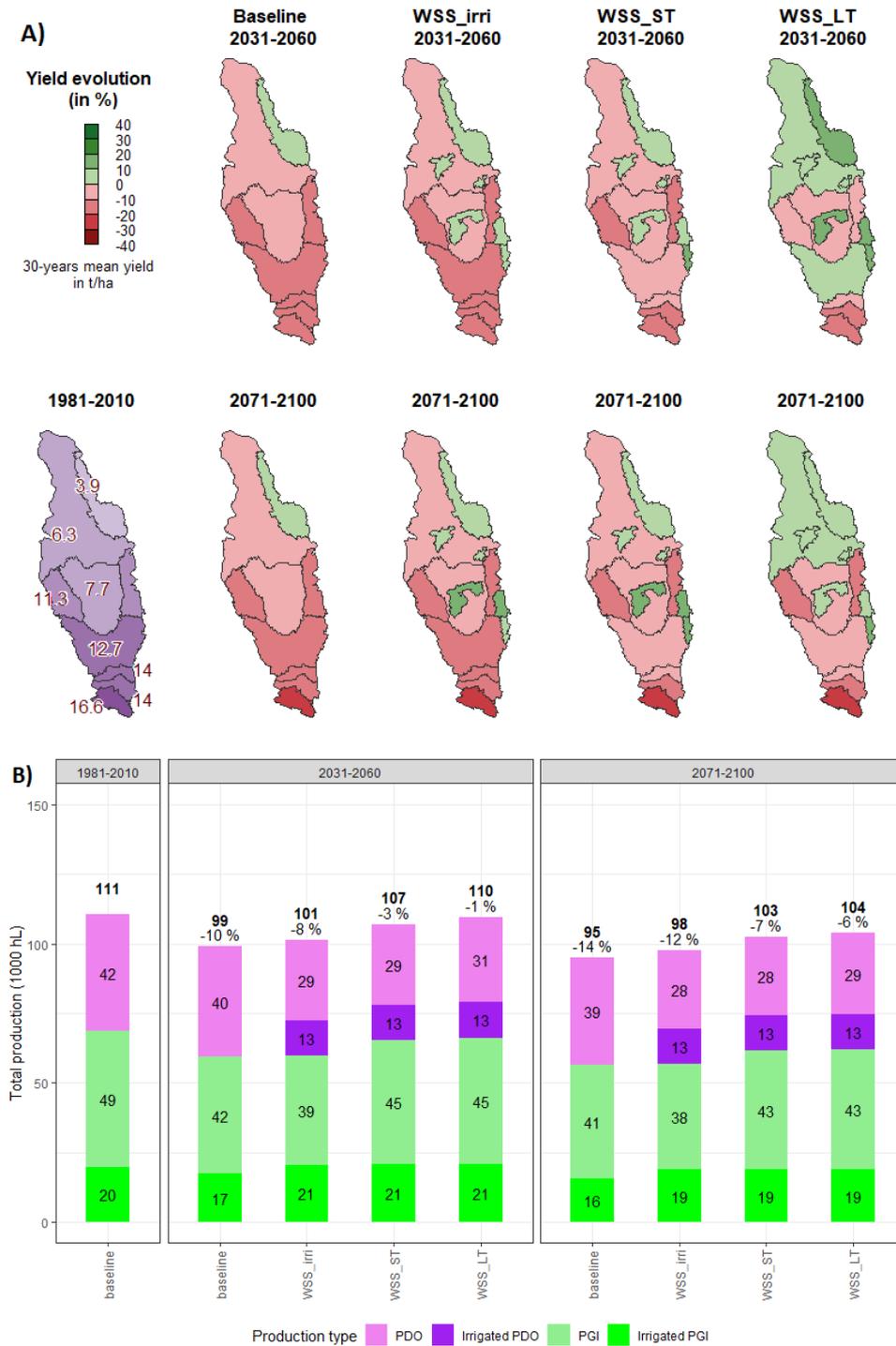


Figure 5.5 Grapevine production evolution in RCP 8.5 for the period 2031-2060 and 2071-2100 in comparison to the historical period (1981-2010): (A) variation of mean yield by production sectors and (B) mean annual production volume according to the type of production (PGI: Protected geographical indication, with a yield objective of 12 t/ha, PDO: Protected designation of Origin, with a yield objective of 6 t/ha).

3.2.3 Relocation strategy to compensate for production losses

Between the aerial images of 1974 and 2010, 330 ha of vineyard were converted into forests (173 ha), fallows (61 ha), cereals (38 ha), pastures (37 ha) and other crops (21 ha) (Figure 5.6). Among those surfaces, 160 ha are located in PDO sectors, mainly in the northern areas, and 170 ha in PGI sectors in the south. The reconversion of those surfaces into vineyard, without considering fallow time, compensated for, and even increased the watershed production volume compared to the historical period (+9% by 2031-2060, +5% by 2071-2100). In average on these new areas, mean yield reached 40 hl/ha for PDO production for the two time periods, and between 70 hl/ha around 2050 and 64 hl/ha around 2100 for PGI production. Local stakeholders confirmed the historical move southward of the vineyard. The causes of the vineyard abandonment were the access difficulties in a mountainous region, and the low yields to be compared to the other plots in the same sector. Local stakeholders estimated that the reconversion of those plots could be possible if wine-growers managed to produce a quality wine, with former varieties. But the problems of labor, costs and access would remain. A finest analysis of soil properties in these areas would be necessary to identify more precisely the interesting sectors for relocation.

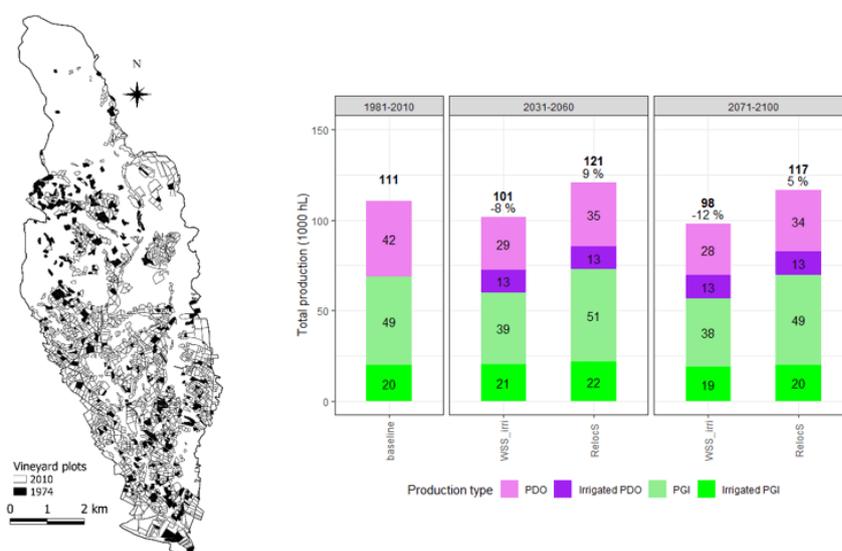


Figure 5.6 Evaluation of the relocation strategy (RelocS) on total production volume at watershed scale. PDO: Protected designation of Origin, PGI: Protected geographical indication production.

3.3 Farm scale evaluation

We calculated the necessary bulk wine price increase that would balance production losses and adaptation costs for eight representative farms in the watershed for the different degrees of water-saving strategy (WSS_irri, WSS_ST, WSS_LT) (Table 5.5). Studied farms were differing by their types of cellar (cooperative or independent), types of production (PDO, PGI or mixed) and their location among the eight production sectors. Average bulk sale prices for the eight farms ranged from 90 €/hl to 190 €/hl in 2020. If no adaptation measures is taken (*baseline strategy*), NecPrice might increase from 1 to 18 €/hl. The most impacted farms would be the members of cooperative cellar producing more than half of their production as PGI wine, without irrigation (Table 5.5).

The extension of irrigation in the watershed (*WSS_irri*) concerned four farms, all with PDO production, with water from hill reservoirs. These farms would convert from 18% to 75% of their surfaces into irrigated system (Table 5.5). The yield gain obtained thanks to irrigation would cover the irrigation costs, especially when the majority of the surface are converted to irrigation. The regional stakeholders agreed with this analysis, on the condition that the wine growers respect the yield limitation set by the PDO syndicates (6 t/ha) to benefit from the price of a PDO wine. They also highlighted that the adaptation costs of irrigation infrastructure of hill reservoir were highly variable, according to location, water sources, topography, etc. We might have underestimated the costs, but one of them argued that 800€/ha/year is the “*maximal acceptable cost*”, i.e. that above, the infrastructure would not be built. Local stakeholders noticed that the high investment requirement would cost a lot to the public institutions. The question of the necessity of such spending was raised. Moreover, the availability of the water is not ensured, creating an additional risk on the revenue that were not considered here (i.e., reservoirs are considered recharged each year).

Short term adaptations (*WSS_ST strategy*) concerned mostly the farm at the south of the watershed. The supplementary costs linked to vigor control (trimming) were low, and the yield gain simulated in the model covered the adaptation costs. This equilibrium between cost and benefit was maintained even for the farm that also adopted a cover crop one inter-row over four during summer. Nevertheless, local stakeholder reminded that the positive effect of severe trimming on yield, as well of its impact on wine quality still need further verifications.

Long term adaptations (*WSS_LT strategy*) concerned the independent farms with vineyard at the north of the watershed. The costs of shading nets were covered by the yield gain. The reduction of planting density, and consequently the reduction of

production costs, was economically beneficial, which corroborates the results evidenced by Van Leeuwen et al. (2019).

In conclusion, no simulated adaptation measure at watershed scale cost more than it brought in. However, only few of them allowed to compensate totally for the effects of climate change: reduced density and irrigation in particular cases. This conclusion corroborated the words that stakeholders repeated several times: “*there is no miracle solution*”. The range of prices evolution (up to 18 €/hL), even if uncertain, did not cover the price variations between years. The local stakeholders concluded that “*the price itself is a real lever*”, and may prevent to invest in expensive infrastructures. A debate took place on the ability of PDO syndicate and PGI organizations to increase their prices. Both could compensate for yield losses by price increase.

Table 5.5 Necessary sale prices evolution (in €/hl) according to farm characteristics and water saving strategies (WSS), for the RCP 8.5 during the period 2031-2060. Blue bars represent the percentage of farm surfaces where the adaptation is implemented. Necessary price evolution increases (↗) if the benefit of adaptation is inferior to the adaptation cost, is null (0) if the benefit of adaptation is equal to the adaptation cost, decreases (↘) if the benefit of the adaptation strategy is superior to the adaptation cost, strongly decreases (↘↘) if the benefit of the adaptation strategy allowed to compensate for negative effects of climate change on necessary price evolution. PDO: Protected designation of Origin, PGI: Protected geographical indication production.

Farm Description				Mean production price	Adaptation (% farm surfaces)					Necessary price evolution for the period 2031-2060 (in €/hl)				
Cellar	Production	Production sector	Surface (ha)		Reference	WSS irri	WSS ST	WSS LT		Shade	Baseline strategy	WSS_irri	WSS_ST	WSS_LT
Independant	High premium PDO	7,8	26	190 €/hl							+1			↘↘
	PDO	7,8	17	158 €/hl	■						+6	↘↘		↘↘
	PDO	5,6,7,8	17	158 €/hl	■						+12	↘		↘
	PDO / PGI	5,6	30	107 €/hl		■	■				+14		↘↘	↘↘
Cooperative	mostly PDO	5,6	30	144 €/hl	■	■					+13	↘	↘	↘
	PDO / PGI	4,5,6	17	125 €/hl	■		■				+18	0	↘	↘
	mostly PGI	3,4	30	103 €/hl			■	■			+17		↘	↘
	Irrigated PGI	1,2	17	90 €/hl		■	■				+12		0	

4 Discussion

4.1 Co-designed adaptation strategies

The four co-designed adaptation strategies were defined according to four variables: harvest date, water efficiency, soil quality, and soil occupation. One strategy does not exclude another, thus we could combine these strategies together in an operational perspective. The potential of these adaptation strategies has been partially evaluated by a model and by local expertise; however, the relevance of these strategies can be debated with the scientific literature.

Exploiting the genetic diversity among grapevine cultivars to limit the effects of climate change on phenology was demonstrated by Morales-Castilla et al. (2020) as successful at a worldwide scale, but critical in some regions like Southern Europe. Our results at the scale of a medium-size watershed in Mediterranean vineyard confirmed the low leeway that give an adaptation strategy based on late-ripening varieties. The effectiveness of the *late harvest strategy* to limit warm temperatures during ripening would rather depend on global decisions regarding future emissions to minimize the global temperature rising. In any case, keeping a variety diversity in the farm is crucial to spread labor over the year (winter pruning, harvest), to limit bioclimatic risks (frost, drought, pest disease), and to participate to the blend during wine-making processes (Nicholas and Durham, 2012).

The *water saving strategy* was analyzed according to three gradual levels of intensity. The first level is the development of irrigation systems, corresponding to the current measures in local policy scheme, which plans an increase of irrigated vineyard surfaces from 16% to 30% by 2030 (Département Hérault, 2019). However, such infrastructures require economic investment that are not ensured. Moreover, their sustainability is debated among stakeholders and scientists (Grantham et al., 2010). The second and third levels of adaptation combine water-saving practices that can be considered as tactical for short-term adaptations and strategic for long term adaptations (Neethling et al., 2017). The strategies design showed that wine growers producing PGI wine in low water constraining areas were more likely to adopt tactical adaptations, while wine-growers producing PDO production in more constraining areas, were more likely to adopt strategic adaptations. However, model's results showed that tactical adaptations, proposed in PGI production systems, are insufficient on the long term to counterbalance the effects of climate change. Thus, wine-growers in this areas will need, in a second time, to find further transformations, more disruptive (planting density, market positioning, etc.). Similar trajectories, with late disruptive trajectory, were previously described by (Merot et al., 2020) for the conversion to organic production of similar farms in the region. For PDO production systems, it is worthy notice that the proposed strategic adaptations are limited by local regulation (i.e. reduced planting density), and local acceptance (i.e. shading nets).

The *soil improvement strategy* mobilized particularly innovative adaptations. A recent review by Marín et al. (2020) recognized the complexity of roots-soil interactions, as well as the importance of its understanding in climate change adaptations. However, the state of knowledge on rootstocks and soil processes did not allow to introduce this complexity into our simple process-based model. Estimating the potential of soil-based adaptations (e.g. organic fertilization, mulching, mycorrhiza symbiosis) is data intensive for soil characterization (pH, texture, soil water content, etc.) and requires multiple-year

experiments to observe effects on grapevine systems. Regional stakeholders suggested to use the model to evaluate the necessary soil available water capacity to maintain historical yield, in order to estimate if the gap between the current and necessary soil water capacity could be filled by changes in soil management.

The vineyard relocation strategy is highly studied at large scale (e.g., de C. Teixeira et al. 2014; Hannah et al. 2013; Malheiro et al. 2010), and our results confirm the interest to move to higher altitudes and latitudes to adapt to climate change. However, the limitations of such studies, including ours, is the little consideration for conservation conflicts in land use (Hannah et al., 2013), the low resolution of the input data (soil, climate, practices, etc.), and the technical feasibility to cultivate those areas. A further step could focus on this strategy, by clarifying, at farm scale, the choice to buy/rent or not new plots, as studied in Delay et al. (2015).

4.2 An original method to design and assess adaptation strategies

The method proposed here is original in that it combines tools used independently in other studies: the participatory design of adaptation strategies and process-based model simulations under future climatic conditions. The study provides insights into sharing knowledge between the modeler's community and stakeholders.

We found difficulties in involving stakeholders into the design process, hence the resulting adaptation strategies included some choices made by the modelers. This could be due to several reasons. First, we dedicated only one workshop to the strategy design. These first strategies could be the reflect of a "testing model approach" from the part of stakeholders, as already experienced in Hossard et al. (2013). A second sequence of strategy design and simulation might permit to refine adaptation strategies, and to potentially complete the list of indicators. Second, the design framework was constrained by modeling tools possibilities. Indeed, our simulations considered a limited number of typical cropping systems in the watershed, a unique driver of change (climate change), and six technical changes to define adaptation strategies. They excluded part of the heterogeneity in the area, the non-climate drivers (regulation, market, environmental policies, water restriction policy), and several adaptation measures at field, farm and landscape scales. This issue might have been avoided by using narrative scenarios to encourage creativity and consistency (e.g. Delmotte et al. 2017). However, the further away we go in time, the more the number of possible values of the variables explodes and the more the narratives would have been difficult to express and to translate into quantitative scenarios (Alcamo, 2009; Leenhardt et al., 2012).

4.3 Enriching exchanges within and between groups of stakeholders

The workshops were conducted separately with local and regional stakeholders. This choice led to different points of interest and discussion within the two groups. The local stakeholders appreciated the “concrete” and local information they acquired on climate change and its potential consequences on their territories. Many initiatives were evocated during the workshop, like the wish to innovate within their farm, the importance of experience sharing, and the need to combine multiple adaptations. They tended to refer to past practices to find solutions, but they deplored the prohibition of some practices decided at regional or national level (e.g. planting density, varieties). Regional stakeholders were more interested in sharing information on other adaptation measures than irrigation, for which they are most often solicited. They highlighted the necessity to produce more references on goblet systems, and former and foreign varieties. The two separated groups produced complementary but sometimes opposite information, as for example on the desirability of the adaptation measures. A further step would be to organize a final meeting to inform a broader audience of the results of our study, as well as to engage discussion.

The organization of the workshops and the facilitation tools were the same for the two groups. In that sense, the interactions between researchers and the two groups of stakeholders did not differ much. However, each group helped at going beyond different limits of the model. For example, regional stakeholders helped at comparing model’s results with their own expertise on other sites. Local stakeholders designed the farm-scale indicators on the basis of the model’s results. They also proposed to consider extremes climate events (frost, hail, heat events) with the introduction of strong production reduction whose probability could vary among climate scenarios. Schaap et al. (2013) demonstrated the relevance of this local knowledge to evaluate the impacts of extreme events in Dutch farms. The next stage of the study should focus on deepening the participatory approach on specific points (e.g. extreme events, soil processes, and farm work organization) to fill the knowledge gaps that stakeholders and researchers identified.

5 Conclusion

Most of the design and evaluation of adaptation strategies rely either on crop models that currently hardly consider local diversity, or on participatory approaches that are not designed to meet quantitative information needs. Therefore, stakeholders (wine-growers, technical advisors, policy makers), hardly grasp a comprehensive understanding of adaptation potential in a given context. In this study, we combined a participatory approach with the use of process-based models, enabling the consideration of the local knowledge into the model-based exploration of adaptation strategies. This approach yielded a good insight in the heterogeneity of vulnerability and adaptive capacity in a viticultural Mediterranean watershed. Although estimates of potential and cost-effectiveness of adaptation are incomplete and uncertain, we identified, in interaction with stakeholders, effective combinations of adaptation measures that can be implemented in different grapevine systems.

In this paper, we designed and assessed adaptation strategies that limit potential production losses due to climate change in the Rieutort watershed. The most productive areas show little leeway to adapt to climate change, even though they appear to be the most affected by the future climatic conditions. The low-productive systems withstand better the climate change and are also more likely to adopt innovative adaptations. However, our study does neither consider the effects of extreme events, nor the effects of socio-economic drivers of changes. Vigor control, soil quality improvement, water-efficient training systems and reduced density were identified as particularly promising adaptation measures and should be further investigated.

PARTIE IV

Discussion Générale

Chapitre 6

Discussion Générale

Synthèse des principaux résultats

L'objectif principal de cette thèse était de tester l'hypothèse que la combinaison de changements techniques à la parcelle et leur distribution dans le paysage donnent des marges de manœuvre supplémentaires pour adapter la viticulture au changement climatique. Cette problématique m'a amenée à (1) établir, avec les acteurs d'un bassin versant, des stratégies d'adaptation spatialisées pour prendre en compte le contexte local et (2) articuler une démarche participative avec de la modélisation pour évaluer quantitativement ces stratégies co-construites.

D'abord, une revue systématique (Chapitre 2) a permis de mettre en évidence le grand nombre de leviers d'adaptation proposés dans la littérature pour limiter les effets négatifs du stress hydrique sur la vigne (QR1¹). J'ai montré que les méthodes d'évaluation actuelles ne permettent pas de quantifier l'effet de combinaisons de leviers d'adaptation appliquées dans un contexte donné. Les études multi-leviers, qualitatives et ancrées dans un territoire, se juxtaposent (sans s'articuler) à des études mono-levier, quantitatives, à fine ou large échelles (parcelle d'expérimentation vs. région).

Ensuite, le développement d'un modèle mécaniste à l'échelle du bassin versant du Rieu-tort a permis de quantifier les principaux impacts du changement climatique selon deux scénarios du GIEC (QR2). Dans le scénario RCP 8.5, l'avancée des cycles phénologiques (-11 et -20 jours sur les dates de vendanges pour les horizons 2050 et 2100) a pour conséquence une augmentation des températures pendant la maturation de baies de respectivement 3 et 6°C. La production viticole totale diminue de 10 et 14% (aux horizons 2050 et 2100) bien que les apports en eau d'irrigation soient multipliés par 1,8 et 2,5 dans certains secteurs de notre zone d'étude (Chapitre 4). La mobilisation des acteurs dans le

¹QR = question de recherche, voir section 1.4, p.28

processus de modélisation a permis de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du milieu (sol, climat) et des systèmes de cultures (cépages, densités, pratiques culturales). J'ai montré que les systèmes en production AOP, situés au nord du bassin et déjà contraints par la ressource en eau, seraient moins impactés en termes de pertes de rendement que les systèmes en production IGP situés au sud du bassin. Les discussions du modèle et de ses résultats avec les acteurs ont permis d'élargir l'évaluation en construisant un indicateur à l'échelle de l'exploitation. Le coût des conséquences du changement climatique (sans adaptation) est de l'ordre de 1 à 18 €/hl de vin produit d'ici l'horizon 2050 selon les types d'exploitations.

Enfin, des stratégies d'adaptation ont été construites avec les acteurs pour limiter les effets négatifs du changement climatique (QR3). Ces stratégies consistent en différentes combinaisons spatiales de leviers techniques. Dans le cadre permis par le modèle numérique, trois stratégies d'adaptation ont été simulées (Chapitre 5). Retarder la date de vendanges par l'implantation de cépages tardifs a montré un léger impact sur les dates de vendanges (- 1 semaine), sans avoir d'impact important sur les températures pendant la maturation des baies (- 0.4°C). La stratégie basée sur l'amélioration de l'efficacité de l'eau par des pratiques économes permet 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 (multipliant ainsi par 3,7 à 4,7 les apports d'eau d'irrigation à l'échelle du bassin). Enfin, l'extension du vignoble permettrait de compenser la perte de production à l'échelle du bassin, sous l'hypothèse que cette extension soit possible. Bien que les stratégies construites prennent en compte certaines contraintes ou opportunités explicitées spatialement par les acteurs, elles ne prennent pas en compte le fonctionnement des exploitations, ni le contexte socio-économique. Une analyse qualitative de l'ensemble des leviers d'adaptation envisagés par les acteurs a mis en évidence certains antagonismes entre efficacité, faisabilité et souhaitabilité des leviers d'adaptation. Ceci montre l'importance de générer davantage de connaissances, quantitatives et qualitatives, afin d'explorer l'ensemble des solutions d'adaptation au changement climatique au sein du territoire d'étude.

Organisation de la discussion générale

La discussion générale des résultats produits dans le cadre de cette thèse est organisée autour de trois thèmes : (i) un retour sur la démarche participatives mise en place (6.1) ainsi que sur le type de résultats recherchés et obtenus (6.2), (ii) l'estimation des rendements en viticulture (6.3) depuis l'échelle de la parcelle à des échelles spatio-temporelles plus grandes, et enfin (iii) les interactions entre modèle et participation pour concevoir des systèmes viticoles dans un contexte de changement global (6.4).

1 Retour sur la démarche participative mise en place

1.1 Identification des acteurs et dynamique de participation

Bien qu'une précédente étude ait été menée entre 2012 et 2015 par INRAE au sein du bassin versant du Rieutort, je n'ai pu récupérer aucun précédent contact au niveau local. Le *turn over* au sein des institutions locales et l'écart de trois ans entre les deux projets n'ont pas permis d'inscrire ma démarche dans une continuité de travaux. Ceci a pu présenter un avantage (peu d'antériorité et donc pas de mauvaises expériences passées) et un inconvénient (dynamique à construire). Je me suis d'abord appuyée sur des personnes-clés du bassin versant, souvent présentes dans plusieurs instances locales, régionales, voire nationales. Ce « noyau » était composé de quatre personnes représentant les trois secteurs de production viticole présents dans le bassin ainsi que la thématique agro-environnementale, transversale aux trois secteurs. Les cinq viticulteurs(trices) ayant participé aux ateliers ont été suggéré(e)s par ces quatre personnes. Puis ils ont été rejoints par les conseillers locaux de la chambre d'agriculture départementale à partir du troisième atelier (postes vacants au début de l'étude). Cette méthode d'identification et de sollicitation des acteurs a permis d'assurer une bonne intégration de nos travaux dans les dynamiques présentes entre les acteurs du bassin. En revanche, le nombre relativement restreint de participants (entre 5 et 9 par atelier) ne permet pas une représentativité complète des systèmes de production viticole du bassin. Par exemple, les grandes exploitations commercialisant en vrac (hors cave coopérative) ou les très petites exploitations (< 5 ha) n'étaient pas représentées. Cependant, dans les discours pendant les ateliers, ces systèmes ont tout de même été évoqués : « *gérer un enherbement pour ceux qui ont des grandes surfaces, c'est très compliqué* ».

Au niveau régional, il n'existait pas non plus de groupe déjà constitué pour réfléchir à l'adaptation de la viticulture au changement climatique. Cependant, chacune des institutions contactées avaient déjà pris position sur cette thématique : l'AOP Languedoc en participant au projet LACCAGE, l'IFV via ses essais et séminaires, le conseil départemental et la chambre d'agriculture départementale en élaborant le schéma départemental d'irrigation, et l'Agence de l'Eau en adoptant un plan de bassin d'adaptation au changement climatique dès 2014². Les représentants des institutions supra-départementales (AOP Languedoc et Agence de l'Eau) n'ont pas souhaité prendre part à la suite de la démarche car ils ont considéré que la participation de leurs appuis locaux (syndicats d'AOP et EPTB Orb et Libron) aux ateliers se déroulant dans le Rieutort était suffisante. Ainsi, le groupe d'acteurs régionaux était composé d'acteurs agissant majoritairement à

²https://www.eaurmc.fr/jcms/dma_40408/fr/plan-de-bassin

l'échelle départementale. La présentation synthétique des résultats de l'étude pourrait néanmoins intéresser les échelles supérieures puisque qu'elle concerne une grande partie des systèmes viticoles du sud de la France, représentés notamment au sein du comité interprofessionnel des Vins du Languedoc (CIVL), de l'Interprofession des vins de pays d'Oc IGP, du syndicat des vigneron indépendants ou des syndicats professionnels des coopératives.

Aucun des participants aux ateliers n'était partenaire du projet de thèse. Chacun libérait de son temps pour la tenue des ateliers. Le rythme peu soutenu d'atelier collectifs (1 à 2 rendez-vous par an) est apparu adapté à ce type d'interactions. L'écart moyen de six mois entre chaque atelier impliquait à chaque rencontre un certain nombre de rappels sur la démarche globale. Par contre, ce faible nombre de phases collectives a pu être compensé par des interactions individuelles. Entre chaque atelier, j'ai été amenée à rencontrer certains participants pour : discuter des résultats de l'atelier avec les absents, partager des données nécessaires à la simulation (ex. encépagement), construire des indicateurs supplémentaires, confronter des résultats du modèle à leur expertise, organiser le suivi agronomique de 10 parcelles dans le bassin. Ces interactions étaient toujours décidées en atelier, afin d'assurer une transparence vis-à-vis des autres participants. Ils ont permis d'approfondir certains aspects de l'étude, abordés trop succinctement en atelier. Globalement, la participation est restée stable, malgré un léger *turn over*, lié principalement à des créations ou disparitions de postes au sein des institutions. On note tout de même une plus grande difficulté pour les viticulteurs en cave particulière à libérer du temps pour venir aux ateliers.

A partir du troisième atelier, les groupes d'acteurs locaux et régionaux ont été rencontrés séparément. Ce choix a eu un fort impact sur les résultats finaux, notamment en permettant d'élargir le groupe des acteurs régionaux (invitation de l'IFV, participation facilitée du fait de la localisation à Montpellier) et en multipliant le temps de parole de chacun. Les apports de chaque groupe ont pu alimenter les réflexions de l'autre groupe. En effet, le rôle de la facilitation a aussi été de décroiser les deux groupes en échangeant les informations : critères d'évaluation, validation locale ou experte des simulations. Voinov and Bousquet (2010) insistent sur l'importance de finaliser un processus de modélisation participative par une phase qualitative de restitution et de dissémination des résultats auprès d'une audience plus large. Cette phase pourrait être portée par les participants de l'étude eux-mêmes et permettrait de discuter et d'élargir la portée des résultats.

1.2 Les attentes vis-à-vis de la participation

Meadow et al. (2015) classifient les modes de participation en quatre catégories : contractuelle, consultative, collaborative et collégiale (Tableau 6.1). La démarche participative mise en place dans cette étude fait appel principalement à une participation consultative des acteurs. En effet, l'objectif était d'utiliser des produits de la recherche (scénarios climatiques et modèles) pour répondre à un problème du monde réel. La question de recherche a été définie par les chercheurs, mais a su intéresser les acteurs de la zone d'étude. La consultation a répondu aux attentes des chercheurs en permettant une meilleure représentation des situations du bassin versant dans le modèle.

Tableau 6.1 Niveau de participation des acteurs dans un processus participatif (traduit de Meadow et al. 2015)

Mode	Objectifs	Origine de la question	Type d'interactions	Engagement des acteurs	Représentation des acteurs
Contractuel	Tester l'application d'une nouvelle technologie ou d'un savoir	Chercheurs	Flux unidirectionnel d'informations des chercheurs vers les acteurs	Principalement des récepteurs passifs d'un nouveau savoir ou d'une technologie	Points de vue et opinions des acteurs non pris en compte
Consultatif	Utiliser la recherche pour résoudre un problème réel	Acteurs ou chercheurs	Les chercheurs discutent avec les acteurs, diagnostiquent le problème et essaient de trouver des solutions	A des stades spécifiques comme la définition du problème, la conception de la démarche, la diffusion des résultats	Les points de vue des acteurs sont principalement filtrés par un tiers (ex. sociologue)
Collaboratif	Apprendre des acteurs pour guider une recherche appliquée	Acteurs	Acteurs et chercheurs sont partenaires	Continu avec un accent sur certaines activités, dépendant du diagnostic partagé du problème	Acteurs eux-mêmes, représentant locaux, membre de l'équipe de recherche
Collégial	Comprendre et renforcer la recherche locale et les capacités de développement	Acteurs	Les chercheurs encouragent la recherche locale et les capacités de développement	Variable mais continu	Acteurs eux-mêmes

Au niveau local, l'approche consultative a permis une bonne communication des résultats d'un modèle mécaniste et une transparence sur ses limites. Contrairement à une approche contractuelle, l'étude a permis de relever les insuffisances du modèle que les acteurs souhaiteraient prioritairement pallier. Au niveau régional, l'approche consultative a favorisé l'échange d'informations entre des institutions plutôt techniques et des institutions administratives. Ces échanges étaient généralement orientés dans un sens, entre ceux qui posaient des questions (acteurs que l'on pourrait considérer comme « puits ») et ceux qui en avaient des pistes de réponses (acteurs que l'on pourrait considérer comme

« source »). A la fin de la démarche, il a été soulevé l'intérêt de ces échanges. Au-delà de l'aspect consultatif, il semble y avoir un intérêt pour un mode de participation collaboratif. Ce type de démarche à l'échelle départementale permettrait de passer de l'analyse d'un cas d'étude vers des pistes d'action à plus large échelle (ex. mise en place d'essais, financement d'initiatives locales) ou des pistes de recherche (amélioration des modèles). Le chercheur pourrait y avoir une place mais au même titre que les autres partenaires. Conway et al. (2019) rappellent l'importance de *knowledge brokers* pour étudier les adaptations au changement climatique, c'est-à-dire d'entités qui se trouvent à l'intersection entre différents groupes et qui agissent en tant qu'intermédiaires dans la transmission des savoirs et des innovations. Le chercheur pourrait jouer ce rôle dans cette recherche en partenariat.

1.3 La démarche participative vue par les participants

Au-delà de l'analyse que j'ai pu faire du déroulé de la démarche et de ses perspectives, il est également pertinent de s'intéresser aux retours qu'ont pu en faire les participants. Il existe plusieurs méthodes et outils pour évaluer un processus de modélisation participative (Ferrand, 2006). Dans le cadre de ma thèse, j'ai demandé aux participants de répondre à un questionnaire à la fin de la démarche afin d'obtenir leur point de vue sur la démarche (réponse à leurs attentes, points forts, points faibles), l'impact qu'elle a eu sur leurs perceptions et leurs actions, ainsi que leur avis sur les résultats produits (Tableau 6.2). Au total, cinq acteurs locaux et cinq acteurs régionaux ont répondu au questionnaire, ce qui constitue un échantillon partiel de l'ensemble des participants.

Les deux groupes de participants attendaient de la démarche de « voir », « savoir », « connaître » les effets du changement climatique et de ses adaptations (Tableau 6.2). Ils ont évalué que ces attentes n'ont été que partiellement atteintes. Le groupe des acteurs régionaux a mis en avant des attentes concernant l'« échange » et le « partage » d'information auxquelles la démarche a permis de répondre. Le principal point faible de la démarche correspond aux limites et aux incertitudes des modèles. On peut alors se demander si les connaissances actuelles en termes de modélisation mécaniste de la vigne sont suffisantes pour engager ces modèles dans une approche participative. Une des pistes identifiées pour la poursuite de l'étude est de réduire les incertitudes du modèle. Cependant les autres pistes visent davantage à élargir le nombre de critères évalués en développant des approches centrées sur l'échelle exploitation et son fonctionnement économique, ainsi que des études sur le microclimat à l'échelle infra-parcellaire.

Ferrand (2006) propose de catégoriser les impacts d'un processus de modélisation participatif en six groupes (externe, normatif, cognitif, opérationnel, relationnel, équité).

Tableau 6.2 Réponses aux questionnaires d'évaluation de la démarche participative (citations)

	Acteurs locaux	Acteurs régionaux
Attentes	Avoir une idée plus précise du changement climatique dans le Rieutort Voir plus clairs sur ce qui nous attend Savoir ce qu'on peut faire Voir les différentes alternatives et solutions	Echanges et apports de connaissances sur les leviers d'adaptation Partager les connaissances et les points de vue Connaître les effets du CC Avoir des éléments concrets sur l'efficacité des mesures
Atteintes des attentes	En partie	Oui
Satisfaction générale	Oui	Oui
Points forts	Projections de ce futur qui engage l'avenir de nos exploitations Scenarios réalistes Rencontres, discussions, échanges	Echanges, écoute, ouverture d'esprit Qualité de l'animation Chiffres Scénarios possibles Diversité des leviers
Points faibles	Incertitude de la modélisation Faiblesse du modèle (cépage) Manque de fiabilité du modèle	Complexité de la problématique Etude focalisée sur le manque d'eau Manque de temps pour échanger Incertitude sur résultats de certains leviers
Changement de perceptions du CC	Oui car plus concrète, plus précise	Oui sur les chiffres Non sur le ressenti du terrain
Changement dans l'action	Oui dans l'envie d'innover (nouveaux cépages) Oui car il y a des adaptations à notre portée	Oui dans l'ouverture vers d'autres leviers que l'irrigation Oui car des arguments concrets pour échanger avec les agriculteurs Non car vient renforcer une dynamique déjà en place vers : - plus de précision dans l'étude des pratiques - des modèles de culture simples et efficaces
Résultat le plus intéressant	Economique Rendement	Solutions alternatives à l'irrigation Résultats sur l'ombrage Aspect territorial Effets cumulatifs des leviers
Plausibilité des résultats	Oui sur la situation de référence Moyen sur impacts du CC et stratégies d'adaptation au CC	
Résultats à développer	Impact de la gestion du feuillage pour un meilleur microclimat (gobelet, port retombant, palissage)	Economique Sensibilité des modèles Approche à l'échelle exploitation Autres indicateurs que le rendement

Il est difficile d'appréhender ces six types d'impacts dans le cadre de notre étude qui était principalement exploratoire et à horizon temporel lointain. Au travers du questionnaire, j'aborde principalement l'impact cognitif de notre étude. L'ensemble des participants ont souligné l'impact positif de cette étude. La perception du changement climatique au sein du groupe d'acteurs locaux a évolué vers une image moins catastrophiste, grâce à des informations concrètes sur le bassin du Rieutort. Ce changement de perception encourage la recherche d'innovations au sein même des exploitations. L'impact cognitif est plus mitigé au sein du groupe d'acteurs régionaux. Ces derniers expriment que cette étude est venue renforcer leurs perceptions et actions actuelles.

2 Discussion des résultats de la démarche participative

2.1 La participation comme moyen de l'étude

Les principaux résultats attendus de la thèse étaient les stratégies d'adaptation co-construites ainsi que leur évaluation par modélisation. Cependant, nos attentes ont pu évoluer au fur et à mesure de la démarche participative. Je reprends la classification des méthodes participatives selon Van Asselt Marjolein and Rijkens-Klomp (2002) pour positionner ma démarche, selon ses objectifs (représenter la diversité vs. obtenir un consensus), et ses résultats attendus (la participation en elle-même ou les résultats de la participation) (Figure 6.1).

Concernant le premier axe de la typologie, cette thèse avait un objectif davantage exploratoire et n'avait pas pour but de converger vers une ou des stratégies faisant consensus. J'ai donc plutôt cherché à représenter la diversité des points de vue afin d'avoir des stratégies contrastées, parfois extrêmes et surtout qui prennent en compte la diversité des systèmes de culture viticoles de la zone d'étude. La phase de développement du modèle et de caractérisation de la situation de référence en interaction avec les acteurs requiert un groupe de participants restreint et particulièrement intéressés (Van den Belt, 2004) pour assurer une participation stable et éviter une remise en cause importante des résultats d'un atelier à l'autre. La diversité de points de vue s'est donc limitée aux seuls secteurs viticole et de la gestion de l'eau. Les points de vue des autres producteurs agricoles, des habitants et élus du territoire, des associations de défense de l'environnement et du secteur touristique n'ont pas été pris en compte.

Concernant le deuxième axe, je constate que ma position a évolué au cours du temps. Jusqu'au troisième atelier, la participation des acteurs avait plutôt pour objectif de

produire les connaissances nécessaires aux choix des modèles et à leur paramétrisation. La participation était alors clairement un moyen plutôt qu'un but. Cependant, la place laissée aux échanges entre participants au cours des ateliers a fait naître d'autres résultats, plus qualitatifs et qui ont été relevés par les acteurs dans leurs réponses au questionnaire (section 1.2). A partir du quatrième atelier, le modèle est devenu un moyen pour nourrir la participation. Par exemple, les résultats de simulations concernant les filets d'ombrage ont amené les acteurs locaux à s'interroger sur d'autres moyens de faire de l'ombre (panneaux photovoltaïques, système de conduite en gobelet). La participation, au sens de l'appropriation des résultats du modèle par les acteurs et les débats qui ont suivis, est devenue davantage un but en soi, bien qu'elle soit demeurée consultative.

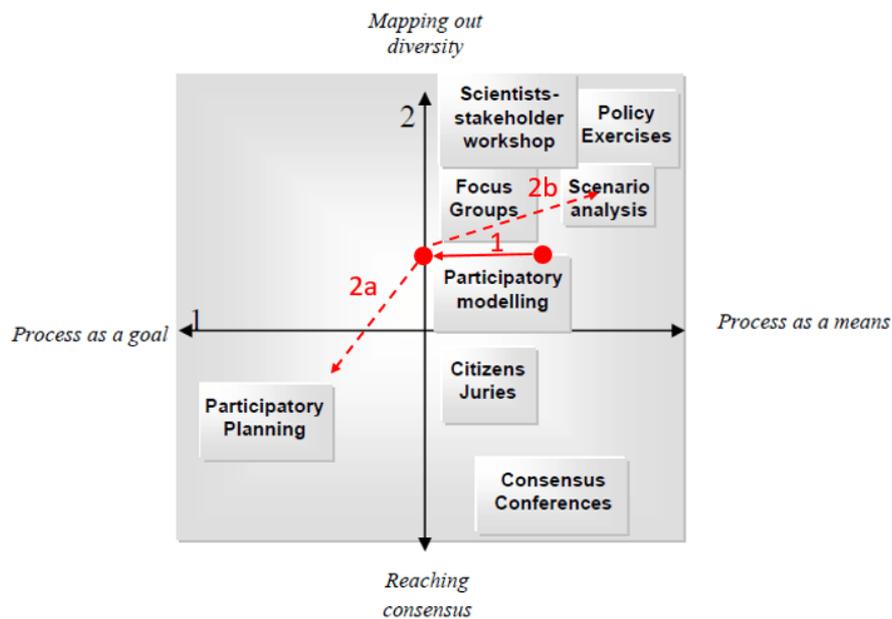


Figure 6.1 Classement des démarches participatives, selon l'axe (1) des objectifs, et (2) des résultats attendus (Van Asselt Marjolein and Rijkens-Klomp, 2002). L'approche mobilisée dans cette thèse est représentée par une flèche rouge continue (1), les trajectoires d'évolution futures de l'étude sont représentées en flèches rouges pointillées (2a, 2b).

Malgré l'évolution dans le temps des types de résultats attendus de ma démarche, ceux-ci restent limités par le choix d'une approche de modélisation participative (Figure 6.1). La poursuite de travaux dans le bassin versant du Rieutort requerrait d'envisager des méthodes différentes qui, à mon sens, pourrait prendre deux orientations. La première viserait à identifier et mettre en place des actions pour s'adapter au changement climatique (flèche 2a sur la Figure 6.1). Au cours des ateliers, plusieurs propositions d'expérimentation ont été faites : cépages, types de taille, porte-greffes, etc. Par ailleurs,

des démarches de planification participative sous la forme de « climathon³ » ont été organisées dans le département de l'Hérault à l'échelle de communes ou d'appellations (Nougier et al., 2020). Ces méthodes ont montré leur utilité pour construire collectivement et prioriser des projets pour répondre à la problématique locale du changement climatique. La deuxième orientation possible serait de développer et d'analyser des scénarios d'adaptation au changement climatique prenant en compte un plus grand ensemble de facteurs d'évolution du système (flèche 2b sur la Figure 6.1). Je détaille cette option dans la section suivante.

2.2 Les types de stratégies d'adaptation construites

L'un des objectifs de la thèse était de construire des stratégies d'adaptation au changement climatique, définies comme des combinaisons spatiales de leviers d'adaptation dans le paysage. Le terme de « stratégie » a remplacé le terme de « scénario » proposé dans le titre initial de la thèse⁴. Selon Alcamo (2009), un scénario se compose de la représentation de la situation initiale, des facteurs de changement et des changements eux-mêmes, et d'une description d'une image du futur. N'ayant pas construit avec les acteurs le seul facteur de changement considéré dans cette étude (i.e. le climat), j'ai préféré utiliser le terme de stratégie, en m'inspirant tout de même de la typologie de scénarios proposée par Börjeson et al. (2006) (Figure 6.2). Parmi les six types de scénarios que ces auteurs proposent, notre étude se rapproche des scénarios exploratoires stratégiques puisque nous nous posons la question de « que peut-il se passer ? » selon les adaptations mises en place par les acteurs. Cependant, le terme de stratégie peut porter à confusion car il correspond également à « la coordination des actions [...] pour atteindre un but » (définition Larousse). Cette assertion du terme stratégie semble être celle retenue par l'IPCC (Carter, 1996), bien que sa définition ne figure pas dans les récents rapports d'évaluation.

Le développement de scénarios d'adaptation aurait permis d'établir quels facteurs de changement internes ou externes (économiques, institutionnels, réglementaires, etc.) pourraient faciliter ou contraindre la réalisation des stratégies co-construites. Certains de ces aspects ont été exprimés dans les ateliers sans avoir été clairement formalisés. L'utilisation de narratifs (ou *storyline*) aurait pu nous amener à exprimer ces scénarios (ex. Baccar et al. 2021). Cependant, en construisant des scénarios exploratoires, le risque serait, soit de « se perdre » dans un contexte où tout bouge et où le futur est

³Le climathon est un événement mondial organisé par la Climate-KIC de l'Union Européenne sur une durée de 24h. Il vise à stimuler la création de projets pour faire face au changement climatique à l'échelle de territoires.

⁴Co-construction et évaluation de scénarios de gestion technique des paysages viticoles adaptés au changement climatique

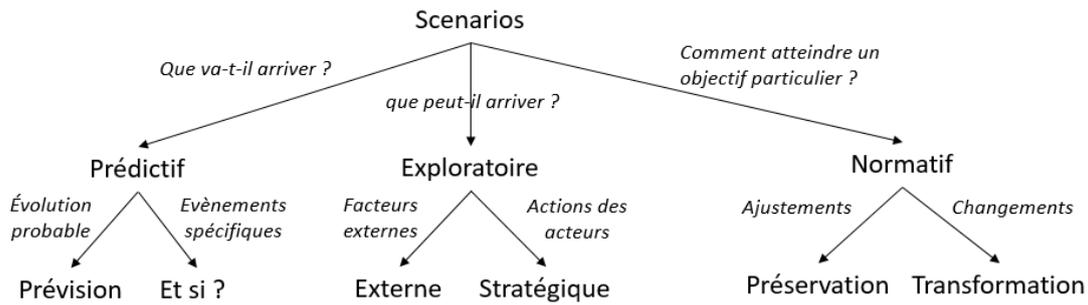


Figure 6.2 Typologie des scénarios selon Börjeson et al. (2006)

incertain (pas seulement en termes de climat), soit à l'inverse de se restreindre à un scénario tendanciel (*business as usual*) (ex. Baccar et al. 2021). Dans cette étude, le fait de se focaliser sur l'image du futur, plutôt que sur les moyens pour y arriver a pu permettre de proposer des stratégies pouvant être considérées comme innovantes (ex. 50% des surfaces des secteurs AOP en faibles densités) voire extrêmes (100% des surfaces avec des cépages tardifs). A partir des informations fournies par l'évaluation de ces stratégies, il serait possible de fixer des objectifs à atteindre, puis de réfléchir à comment les atteindre (scénarios normatifs). Plusieurs études tendent à combiner ces deux types de scénarios (exploratoires et normatifs) pour délimiter des stratégies cohérentes et distinctes (ex. Audouin et al. 2018; Milestad et al. 2014; Paas et al. 2021). Dans ces études, la phase de scénarisation exploratoire précède la phase de scénarisation normative, ce qui renforce l'idée que les stratégies co-construites dans cette étude peuvent constituer une première étape vers l'établissement de scénarios d'adaptation.

A l'échelle nationale, une étude prospective a permis d'identifier quatre scénarios d'adaptation de la filière viticole (Aigrain et al., 2016) : conservateur, innovant, nomade et libéral. Les stratégies co-construites dans le cadre de cette thèse peuvent être replacées dans ce cadre (Figure 6.3). D'abord, les quatre stratégies proposées dans cette thèse se situent entre les scénarios conservateur et innovant. Les leviers conservateurs envisagés sont la modification de la gestion de la canopée, la gestion adaptative de l'enherbement et l'introduction de cépages plus tardifs, plus productifs ou tolérants à la sécheresse. L'irrigation, bien que considérée comme un levier innovant à l'échelle nationale (Figure 6.3), peut être vue comme un levier conservateur en région méditerranéenne puisqu'elle y est déjà développée. Les leviers innovants sont la réduction de densité accompagnée par la conduite des vignes en gobelet, l'amélioration de la qualité des sols, les dispositifs d'ombrage. Le levier « migration » n'est envisagé qu'à faible ampleur puisqu'il n'a

pas été évoqué de changement drastique des délimitations des aires de production et d'appellation. Il y a deux intérêts à comparer les résultats de cette thèse aux propositions nationales. D'abord, cela permet de donner un exemple de comment peuvent se décliner ces scénarios dans un petit territoire. J'illustre notamment que ceux-ci peuvent cohabiter et que leur combinaison permet de répondre partiellement aux enjeux du changement climatique. Ensuite, les résultats de la prospective nationale incluent la description de chemins conduisant à chaque type de scénarios, qui pourraient aider à la construction de scénarios à l'échelle locale (ex. « coopération étroite de la filière avec la recherche » pour le scénario innovant, « goût des consommateurs pour les histoires de terroirs » pour le scénario conservateur).

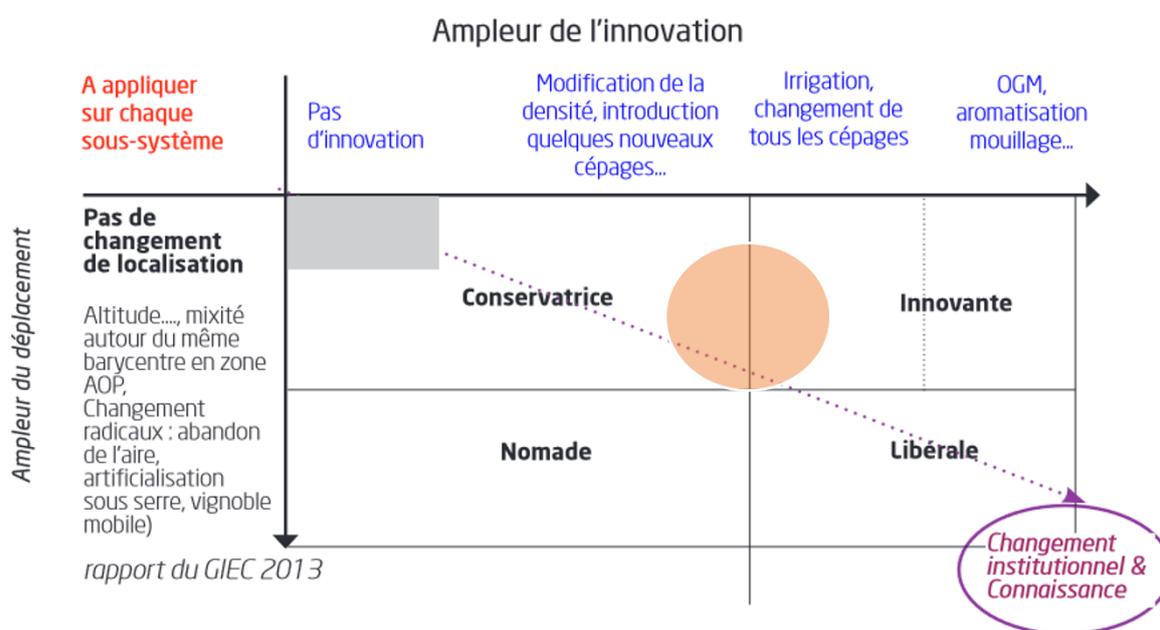


Figure 6.3 Quatre scénarios d'adaptation de la filière viticole selon l'ampleur de l'innovation et du déplacement des régions viticoles (Aigrain et al., 2016). Les stratégies co-construites dans le cadre de la thèse se situent dans le cercle orange.

2.3 Les indicateurs d'évaluation des stratégies d'adaptation

L'évaluation des stratégies d'adaptation dans le cadre de cette étude a été menée principalement par simulations, et le rôle des acteurs était de discuter leurs résultats. Cependant, les résultats bruts d'une simulation (i.e. une stratégie sur une période de 30 ans) sont très nombreux : 1660 parcelles de vigne x 30 ans = 49 800 valeurs par sorties annuelles du modèle (ex. rendement). Les acteurs ont été sollicités pour construire les indicateurs d'évaluation, c'est-à-dire les façons de représenter les sorties du modèle, au cours d'un atelier mené d'abord avec les acteurs régionaux puis avec les acteurs locaux

(atelier 3). Les acteurs régionaux ont été les premiers à fournir une liste d'indicateurs qui a été proposée ensuite aux acteurs locaux. Les acteurs locaux n'ont pas proposé d'autres indicateurs à cet atelier. Je note que les acteurs locaux ont proposé de nouveaux indicateurs plus tard dans la démarche, à l'atelier 4. Il semble donc que la définition des indicateurs d'évaluation demande un processus itératif, particulièrement dans le cadre d'un modèle complexe, où il faut « donner à voir » des résultats du modèle afin d'en améliorer les représentations. Le fait d'utiliser majoritairement des indicateurs proposés par le groupe d'acteurs régionaux a entraîné quelques incompréhensions dans le groupe local, comme le fait d'utiliser la température moyenne pendant la maturation des baies comme *proxy* de la qualité de la vendange. Davantage de temps aurait pu être consacré à comprendre la multiplicité d'indicateurs agro-climatiques perçus par les acteurs locaux, qui pourraient donner des informations sur la qualité de la récolte.

Au final, la majorité des indicateurs co-construits avec les acteurs correspondent à des moyennes sur 30 ans. Or, l'enjeu du changement climatique est également de s'adapter à une variabilité interannuelle plus importante. Cet enjeu a été relevé par les acteurs dès le premier atelier, et confirmé par l'analyse des projections climatiques (Annexe F). Le modèle annonce une baisse de production moyenne dans le bassin versant d'au maximum 14% (RCP8.5 à l'horizon 2100). Les acteurs locaux n'ont pas trouvé cette baisse très importante, au regard de la variabilité qu'ils appréhendent d'un millésime à l'autre. Les données statistiques de la production viticole héraultaise montrent en effet un coefficient de variation de 13% entre 2009 et 2019 (FranceAgriMer, 2020). Il serait donc pertinent de s'intéresser également à l'évolution de la variabilité interannuelle entre les différentes simulations réalisées pour évaluer si elle évolue de manière plus importante que la production moyenne.

3 Estimation des rendements viticoles

3.1 Les modèles de culture pour la vigne

Dès le début de la démarche participative, le rendement est apparu comme un critère important pour l'évaluation des impacts du changement climatique et des adaptations. C'est d'abord le rendement en quantité qui a été le plus évoqué dans les premiers ateliers. Les efforts de modélisation se sont donc concentrés sur cet aspect. Il faut tout de même souligner que les aspects qualitatifs (degré d'alcool, acidité) ont posé de nombreuses questions dans les ateliers suivants sans pouvoir être pris en compte dans les simulations. Le seul modèle existant fournissant en sortie des variables concernant la composition des baies est le modèle STICS qui utilise une relation empirique entre teneur en eau des baies

et concentration en sucre (Moriondo et al., 2015). Nous avons préféré prendre en compte la qualité de la récolte via des indicateurs agro-climatiques, facilement accessibles en sortie du modèle développé.

La vigne, en tant que plante pérenne, est un système complexe à modéliser et l'enjeu des modélisateurs est d'identifier les principaux facteurs et phases déterminant les composantes du rendement pour construire un modèle relativement simple (Habib et al., 2001). Cette parcimonie était d'autant plus nécessaire que la confrontation du modèle avec les acteurs demandait un effort de transparence et de compréhensibilité (Van den Belt, 2004). Le modèle GraY développé pendant cette thèse répondait à cet objectif. En partant de l'hypothèse déjà présente dans la littérature selon laquelle le rendement de la vigne est principalement limité par la contrainte hydrique (Guilpart et al., 2014), le modèle GraY permet de calculer un rendement potentiel permis par la disponibilité en eau. Cependant, les relations mises en évidence mériteraient d'être validées sur une plus large gamme de cépages, de types de sols, de conditions climatiques et de pratiques culturales. Il existe plusieurs jeux de données qui abordent à la fois les composantes du rendement et le niveau de stress hydrique (ex. Levin et al. 2020a; Zufferey et al. 2018). Une méta-analyse permettrait de passer en revue les types de réponses des composantes du rendement à la disponibilité en eau à certaines périodes-clés. Elle permettrait également d'identifier dans quelles conditions climatiques ou culturales (irriguées ou non, tailles courtes ou longues, cépages) ces relations sont valides ou de quelle manière elles sont altérées.

Dans les cas où le rendement ne serait pas limité par la disponibilité en eau, les autres facteurs limitants pourraient être abiotiques (Figure 6.4), biotiques (pression maladie particulièrement en années humides), ou liés aux pratiques mises en œuvre pour respecter les cahiers des charges des appellations. De récents travaux montrent l'intérêt d'opter pour des approches permettant d'intégrer l'information climatique et opérationnelle sur l'ensemble du cycle de la vigne (Laurent et al., 2021). Cependant, ces approches sont intensives en données et sont plutôt orientées vers la prévision annuelle et opérationnelle du rendement. Cependant, il serait tout de même pertinent de décomposer de manière plus fine le cycle de la vigne afin de prendre en compte l'effet, non considéré dans le modèle GraY, des conditions climatiques (températures, pluies, etc.) sur des composantes intermédiaires qui se déterminent à des périodes-clés, comme la nouaison avec des phénomènes de coulure et de millerandage qui influent sur le nombre de baies développées (Zhu et al., 2020).

Une récente revue de littérature montre les capacités des modèles mécanistes en viticulture à tenir compte des effets des pratiques culturales sur le rendement et dans de rares cas la composition des baies (Knowling et al., 2021). Parmi ces pratiques, les auteurs

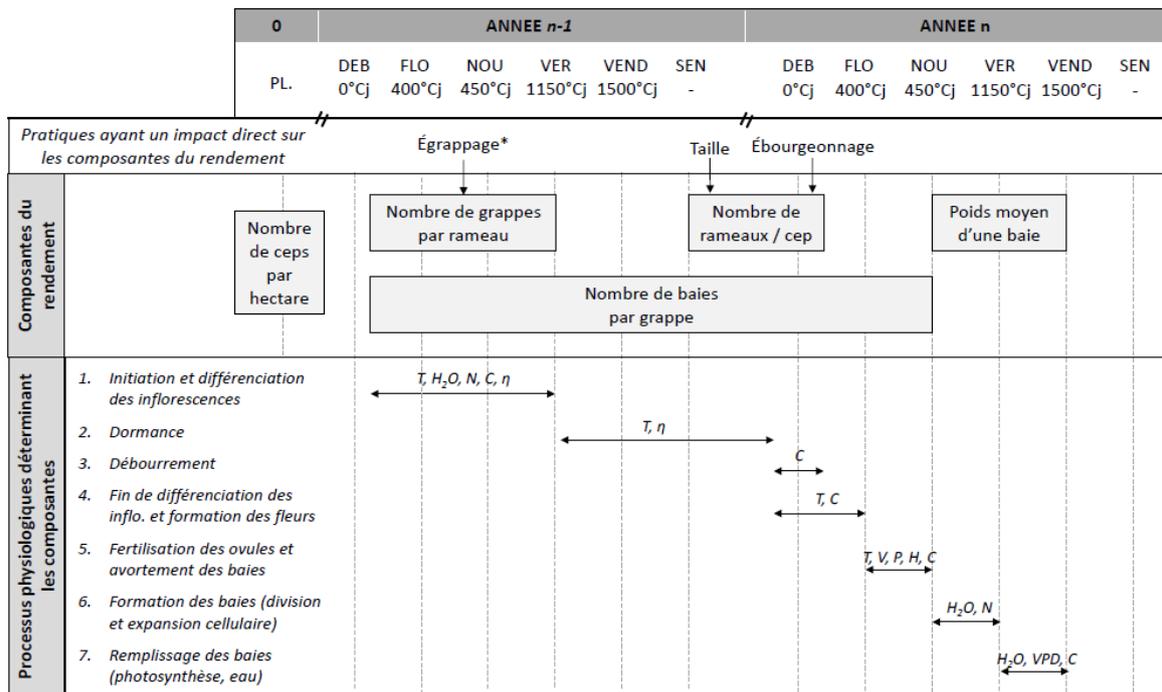


Figure 6.4 Étapes et facteurs limitants de l’élaboration du rendement de la vigne (d’après Guilpart et al. 2014). C : disponibilité en carbone et rapports source - puits. T : température. H₂O : stress hydrique. N : stress azoté. n : lumière, rayonnement. V : vent. P : précipitations. H : humidité de l’air. VPD : déficit de pression de vapeur. PL : plantation. DEB : débourrement. FLO : floraison. NOU : nouaison. VER : véraison. VEND : vendange. SEN : sénescence. °Cj : degré-jours en base 10.

soulignent que la gestion de l’eau et la gestion de la canopée sont les mieux représentées. Notre étude démontre justement que ces deux types de pratiques constituent des leviers d’adaptation au changement climatique importants. Cependant, dans la pratique, l’application de tels modèles dans des études sur le changement climatique conduisent le plus souvent à une uniformisation spatiale du paramétrage de ces pratiques culturales. Par exemple Fraga et al. (2016) ne considèrent qu’une seule densité de plantation (4000 pieds/ha), une même gestion de la canopée et ne considèrent pas l’irrigation pour simuler les impacts du changement climatique dans l’ensemble des vignobles européens, avec le modèle STICS. De plus, dans cette étude, une seule variété est considérée (Pinot Noir), alors que le modèle STICS est paramétré pour au minimum huit variétés différentes (Garcia de Cortazar Atauri, 2006). La principale limite à l’intégration des pratiques dans ce type de travaux de modélisation semble donc relever davantage de choix méthodologiques pour renseigner les données d’entrée, plutôt que des outils eux-mêmes. Ces choix peuvent être guidés par la disponibilité de données ou le domaine de validité du modèle. Pour appuyer cette dernière idée, Knowling et al. (2021) soulignent le fait que les capacités

des modèles à simuler les effets des pratiques culturales sur les rendements dans différents contextes n'ont pas été rigoureusement démontrés. Cette remarque questionne la capacité des modèles à évaluer les adaptations techniques au changement climatique. De plus, Knowling et al. (2021) n'ont pas relevé dans leur revue des modèles existants, un certain nombre de pratiques qui ont été abordées au cours de nos ateliers comme : la gestion du couvert herbacé (spontané ou semé), le type de taille (courte ou longue) et les systèmes de conduite (palissé ou en gobelet). Repenser le développement d'un modèle mécaniste à partir des pratiques que l'on veut simuler paraît une opportunité pour interagir avec les acteurs de la filière, comme nous avons pu le faire avec le modèle WaLIS-GraY qui a permis de prendre en compte les pratiques d'entretien du sol et du couvert herbacé.

3.2 Vers des modèles intégrés, aux multiples échelles spatiales et temporelles

Notre étude s'intéressait à l'échelle du paysage dans l'objectif de prendre en compte différents éléments qui ont un impact sur la production viticole (variabilité spatiale des sols, du climat et des pratiques culturales), et qui sont situés à différentes échelles imbriquées (parcelle, exploitation, bassin versant). Dans le cadre de cette étude, le modèle intégré aborde trois échelles temporelles (journée, année, et trente années de simulation) et trois échelles spatiales (rang/inter-rang, parcelle et bassin versant). Sur le plan technique, ceci a été rendu possible par la plateforme OpenFLUID qui a été développée pour gérer le couplage, synchrone et en interactions, de modèles à des échelles multiples. Ainsi la plateforme OpenFLUID s'est montrée appropriée pour :

- représenter l'hétérogénéité spatiale du paysage agricole (réservoir utile, climat, aires d'appellations, périmètres irrigués, encépagement, parcelles enherbées) ;
- coupler l'échelle parcellaire à l'échelle du bassin versant en assurant la propagation du ruissellement entre parcelles et réseau hydrographique ;
- organiser les processus dans le temps et dans l'espace. Chaque simulation commence par le calcul de la phénologie sur l'ensemble des parcelles viticoles du bassin. Pour chaque parcelle, chaque jour de simulation débute par une évaluation de l'état du système (statut hydrique de la vigne, indice foliaire de l'herbe) pour déterminer ou non une action sur le système (irrigation, désherbage mécanique, tonte). Le bilan hydrique journalier est calculé et est suivi instantanément par la propagation du ruissellement vers la parcelle ou les tronçons hydrographiques en aval. Enfin, à la fin de chaque année, un rendement est calculé pour chaque parcelle viticole.

La plateforme OpenFLUID a été un véritable atout pour procéder aux échanges de variables entre modèles individuels. Ainsi, le modèle WaLIS a pu être utilisé sur de nombreuses parcelles simultanément et de façon dynamique : des paramètres jusqu’alors fixes comme les stades phénologiques, les dates d’irrigation et les paramètres d’infiltrabilité de l’eau dans le sol ont pu évoluer au cours du temps. Le caractère modulaire de la plateforme OpenFLUID est d’autant plus intéressant qu’il permet d’envisager l’intégration de modules supplémentaires afin de prendre en compte davantage d’échelles et de processus, notamment identifiés par les acteurs en ateliers (Figure 6.5).

A l’échelle de la parcelle, les processus qu’il serait souhaitable de développer correspondent aux effets de la contrainte azotée, des bioagresseurs et du dépérissement (maladies chroniques et mortalité) sur le rendement. Si des modèles sont disponibles pour les ravageurs de la vigne (Lessio and Alma, 2021), des travaux en cours portent sur la modélisation des dégâts associés aux maladies annuelles (comm pers M. Perez), et sur la réponse du rendement à la contrainte azotée (comm pers A.Métay et A. Pellegrino), annonçant ainsi une possible intégration future de ces composantes dans le modèle.

L’échelle de l’exploitation est une échelle-clé de l’adaptation au changement climatique (Reidsma et al., 2010). Les participants de l’étude ont relevé trois principaux éléments à considérer. D’abord, la gestion d’une exploitation viticole, et son adaptation au changement climatique, impliquent de réfléchir en terme de rotations sur le long terme. Allonger la période de jachère est une adaptation envisagée par les acteurs pour assurer une meilleure pérennité du vignoble. Cependant, cette adaptation requiert une surface de l’exploitation suffisante pour agrandir les surfaces en jachère. Or les acteurs locaux constatent un renouvellement accéléré du vignoble qu’ils attribuent au dépérissement. L’augmentation des surfaces non productives, car encore jeunes, pourrait être un frein à certains leviers d’adaptation. Ensuite, il est crucial de s’intéresser à l’économie des exploitations pour voir si les revenus sont suffisants pour investir dans des adaptations en fonction des prix du marché et des types d’exploitations. Enfin, la prise en compte des opérations culturales via les temps de travaux, le matériel disponible et les fenêtres météorologiques, apporterait des informations cruciales sur la faisabilité des adaptations du point de vue technique. Le couplage d’un modèle biophysique avec un modèle d’exploitation est possible sous OpenFLUID et a déjà été réalisé auparavant avec le modèle DHIVINE (Martin-Clouaire et al., 2016). Il existe de nombreuses façons de représenter une exploitation agricole en contexte de changement climatique (optimisation, multi-agent, dynamique) (Van Wijk et al., 2012). Cependant, aucun modèle, mis à part le modèle DHIVINE (dont l’environnement de programmation de la partie décisionnelle n’est plus disponible) ne concerne les exploitations viticoles.

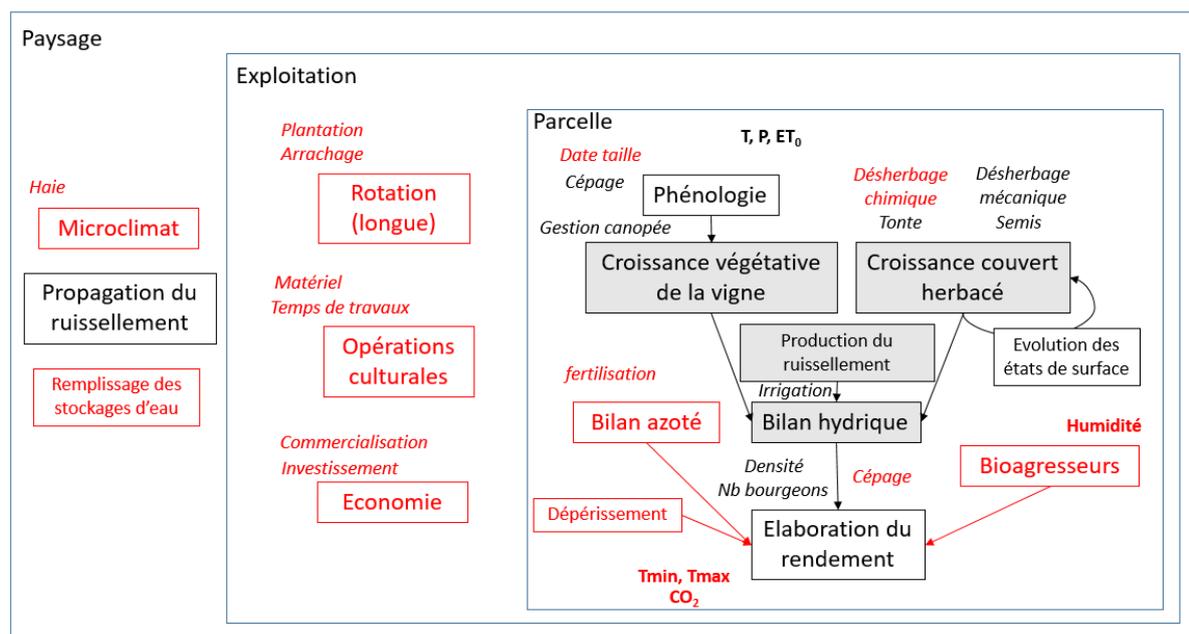


Figure 6.5 Synthèse des couplages permis par la plateforme OpenFLUID aux échelles de la parcelle, de l’exploitation et du paysage. Dans les encadrés figurent les processus modélisés, en italique les actions sur le système et en gras les variables climatiques. En grisé, le modèle WaLIS au début de la thèse, en blanc les couplages effectués au cours de la thèse, et en rouge les couplages que les acteurs ont identifiés comme nécessaires à réaliser. Les échelles paysage et exploitations agricoles déterminent le fonctionnement du système « parcelle ».

A l’échelle du paysage, une description plus fine du climat pourrait être développée en premier lieu, en prenant notamment en compte les pentes, les expositions, les bords de parcelles (arbres, ruisseaux). Les travaux de Le Roux et al. (2018) et de de Rességuier et al. (2020) tendent à améliorer la représentation spatiale des températures mais sur de petits territoires (de l’ordre du km²) et moyennant une instrumentation importante (installation de nombreux capteurs). En deuxième lieu, une étude sur la localisation et les possibilités de stockage hivernal de l’eau est une piste avancée par les acteurs. Le récent développement du modèle MHYDAS-Small-Reservoirs (Lebon, 2021) sous OpenFLUID permettrait d’explorer cette piste. Cependant, la modélisation fine des processus hydrologiques au sein du bassin versant nécessite des données de pluviométrie infra-journalières qui ne sont actuellement pas disponibles dans le cadre d’une étude utilisant les projections issues des modèles climatiques.

La plateforme OpenFLUID offre de multiples possibilités de développement. Cependant, il existe deux principales limites à l’ensemble des couplages proposés : l’une est technique, l’autre analytique. Du point de vue technique, une utilisation plus efficace d’OpenFLUID demanderait de n’utiliser que des modèles codés en C++. En effet, bien

que WaLIS (langage R) ait pu être intégré à OpenFLUID, le temps de communication entre les deux environnements R et C++ a rendu la durée de simulation importante (3,5 jours par simulation⁵). Du point de vue analytique, la multiplication des modules, et donc des données et des sources d'incertitude, risque de rendre l'analyse des résultats plus difficile, alors que le nombre de données en sortie du modèle intégré actuel est déjà très grand. Ainsi, si les futurs développements portent sur l'amélioration de la résolution spatio-temporelle des processus (microclimat, hydrologie), il faudra sans doute réduire l'étendue des simulations à quelques années climatiques types, au lieu de trente années consécutives. A l'inverse, si les futurs développements portent sur l'ajout d'une échelle spatiale comme l'exploitation agricole, il faudra sans doute réduire l'étendue spatiale de la simulation, en se limitant à quelques exploitations types (ex. Rodriguez et al. 2014).

3.3 Vers d'autres types de modèle

L'avantage de développer un modèle mécaniste dans le cadre de cette étude est que celui-ci est peu biaisé par la participation elle-même. En effet, bien que les attentes des acteurs aient été prises en compte pour choisir les modèles, la structure de ces derniers ne dépend pas des participants de l'étude. Ainsi, ce modèle est suffisamment générique pour être utilisé dans d'autres contextes. Malgré un effort de simplification, le modèle utilisé dans cette thèse est devenu, au fur et à mesure des couplages (phénologie, bilan hydrique, puis rendement et enfin ruissellement), de plus en plus complexe. Ceci se traduit par une quantité de données importante et des difficultés de paramétrage (réservoir utile, destruction des couverts végétaux, etc.). Le nombre même de fonctions et d'entités (parcelles, tronçons hydrologiques) que le modèle prend en compte est important, ce qui le rend complexe.

Banos (2013) propose une catégorisation des modèles de systèmes complexes en géographie selon deux axes (Figure 6.6). L'ordonnée correspond au niveau d'abstraction du modèle (particulier vs stylisé). L'abscisse correspond au niveau de simplification du modèle (KISS⁶ vs KIDS⁷). Lammoglia et al. (2019) ont repris ce cadre d'analyse pour positionner les modèles multi-agents développés en viticulture. Je reprends leur figure pour y ajouter les modèles mécanistes cités dans ce travail de thèse (Figure 6.6). Les modèles mécanistes se situent dans les cadrans en haut de la figure puisque leur définition même est de représenter des situations générales transposables dans plusieurs conditions de lieu ou de temps. Sur l'axe des abscisses, le modèle développé dans le cadre de

⁵Une simulation correspond à une stratégie mise en place sur 30 années sur l'ensemble des parcelles du bassin (3645 entités) et pour un scénario climatique

⁶KISS pour Keep It Simple Stupid

⁷KIDS pour Keep It Descriptive Stupid

cette thèse se situe dans une position intermédiaire entre le modèle simple de réponse du rendement à l'eau proposé par Van Leeuwen et al. (2019) et les modèles détaillés de type STICS. Sur l'axe des ordonnées, le modèle développé est stylisé, tout en étant majoritairement paramétré à l'aide de données recueillies en contexte méditerranéen, ce qui limite tout de même son niveau d'abstraction vis-à-vis du contexte. Le modèle développé constitue bien une approche originale dans la manière de simuler le rendement de la vigne.

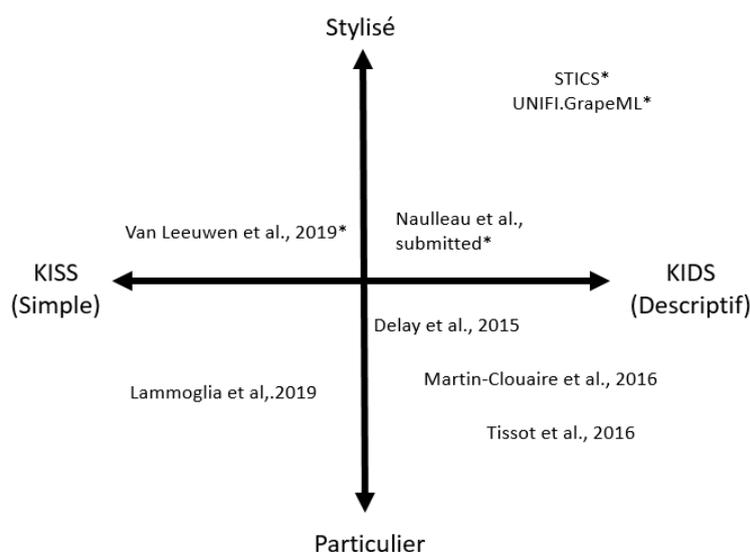


Figure 6.6 Classification des modèles appliqués à la viticulture selon la grille proposée par Banos (2013) (adapté de Lammoglia et al. 2019). Seuls les modèles marqués d'un astérisque simulent le rendement.

L'utilisation de données issues des projections climatiques en entrée de modèles de culture présente un certain nombre de limites, du fait des incertitudes liées à la fois aux projections climatiques et aux prévisions du modèle (Corbeels et al., 2018). Il est d'ailleurs vraisemblable que ces incertitudes soient supérieures aux variations de rendement calculées par le modèle entre les différents scénarios climatiques et stratégies d'adaptation. A titre d'exemple, les incertitudes calculées par Corbeels et al. (2018) pour le rendement du maïs sont de l'ordre de 30 à 40%, en utilisant un ensemble de 17 modèles de climat et un seul modèle de culture. On peut donc se demander s'il n'y avait pas un moyen de quantifier les impacts du changement climatique et de ses adaptations sur le rendement de la vigne sans utiliser de modèles mécanistes.

La Figure 6.6 présente quelques exemples de modèles multi-agents utilisés en viticulture. Aucun d'entre eux ne va jusqu'à la simulation du rendement. Cependant les

modèles DHIVINE (Martin-Clouaire et al., 2016) et SEVE (Tissot et al., 2017) sont deux modèles multi-agents simulant les pratiques culturelles, ainsi que le statut hydrique de la vigne (pour le modèle SEVE seulement) de manière très détaillée. Il pourrait être envisagé d'intégrer l'estimation du rendement à leurs travaux. Comme le soulignent Rouault et al. (2020), il semble encore impossible d'estimer des variations de rendement à partir de variations de pratiques uniquement, tant les conditions climatiques et les pratiques interagissent entre elles. Pour appuyer ce propos, au cours de l'un des ateliers que j'ai menés (atelier 3), nous avons cherché avec les acteurs locaux à déduire du rendement de la variété syrah calculé par le modèle, celui d'autres cépages. Nous avons alors fait face à un nombre très important de facteurs qui pourraient faire varier le rendement d'un cépage à l'autre : le type de sols, l'âge de la parcelle, le type de taille, la durée de la contrainte hydrique, etc. Comprendre les effets locaux du changement climatique sur le rendement en viticulture doit passer par une meilleure compréhension des facteurs, biophysiques et culturels, qui le déterminent. La mobilisation d'outils participatifs comme les diagrammes de boucles causales (*causal loop diagram*, Lane 2008) en amont d'une modélisation quantitative est une perspective intéressante pour déterminer le cadre de contraintes dans lequel le rendement devrait être prédit par le modèle, et identifier des réponses observées que le modèle devrait être capable de simuler. De plus ce type d'approches pourrait permettre de prendre davantage en compte des facteurs socio-économiques qui ont également un fort impact sur la quantité produite (cahiers des charges, prix du marché, mode de commercialisation etc.).

4 L'interaction modèle/participation pour élargir le champ des thématiques

4.1 Les défis à relever pour combiner modélisation et participation

Bien qu'il existe des cadres conceptuels pour articuler modélisation et participation (ex. modélisation d'accompagnement ; ComMod 2005), il n'existait pas avant cette étude de cadre préconçu pour utiliser des modèles mécanistes au sein d'une méthode participative pour répondre aux défis du changement climatique. L'approche mise en place dans cette thèse a permis d'explorer certains défis que posent ce type d'étude. Je reviens dans cette partie sur deux principaux défis : la difficulté à travailler sur des périodes longues et lointaines et le partage d'informations de natures différentes que ce soit en entrée ou en sortie du modèle.

Il existe une différence temporelle entre l'étude d'impact du changement climatique (*top-down*) qui se projette dans le futur, et les approches *bottom-up* qui regardent le présent et le futur proche (Conway et al., 2019). Notre étude s'est attachée à conserver le cadre des études *top-down* en menant une analyse sur des périodes de 30 ans. Ce choix 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 (section 2.2), et vis-à-vis de l'analyse de résultats produits en très grand nombre (section 2.3). Dans d'autres études, la construction participative de scénarios d'adaptation a montré des résultats satisfaisants en se focalisant sur quelques années climatiques seulement (ex. Sautier et al. 2017) ou bien en travaillant à des horizons temporels ne dépassant pas 2050 (ex. Schaap et al. 2013). Le caractère pérenne de la vigne encouragerait davantage à poursuivre l'étude en considérant des années successives, mais sans doute en rapprochant l'horizon temporel de l'étude.

La représentation du bassin versant du Rieutort en entrée du modèle a requis l'utilisation de nombreuses informations de natures et de sources différentes : données génériques issues de bases de données nationales (ex. RPG, BDSol, INAO), données quantitatives fournies par les institutions participant à l'étude (ex. encépagement, densités de plantation, types de production), données issues de mesures de terrain, informations qualitatives fournies en atelier (ex. délimitation des grands types de sol de la zone d'étude). L'hybridation de l'ensemble de ces informations a permis d'atteindre un consensus pour représenter le bassin versant d'étude, permettant ainsi de poursuivre la démarche. Cependant, ce consensus ne satisfait complètement ni les spécialistes des sols par exemple, ni les viticulteurs eux-mêmes qui font face au sein de leur exploitation à une hétérogénéité plus importante que celle représentée dans le modèle. La représentation actuelle du bassin versant a été guidée par la thématique et les modèles mobilisés dans cette thèse. Elle nécessitera sûrement des ajustements et des précisions pour l'étude de nouveaux enjeux dans le bassin (ex. qualité de l'eau⁸).

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.). Au cours des deux derniers ateliers de la démarche, le groupe d'acteurs locaux (qui n'avait proposé que peu d'indicateurs agrégés jusqu'à présent) a exprimé

⁸En référence au projet RIPP-Viti (Réduire les Impacts des Produits Phytosanitaires en viticulture méridionale à l'échelle territoriale) mené par INRAE dans la même zone d'étude (2020-2023).

ses attentes vis-vis du modèle plutôt sous la forme de questions. Ces questions avaient déjà été soulevés par l'équipe de chercheurs, sans que le modèle ou la littérature puisse y répondre. Au travers de formulations simples, les acteurs ont trouvé des manières astucieuses de calculer des indicateurs pertinents et calculables à partir des sorties du modèle (Tableau 6.3). La construction des indicateurs demande du temps et des itérations, particulièrement dans le cas où le modèle n'existe pas auparavant. En effet, les acteurs et les modélisateurs travaillaient ensemble et en même temps à l'amélioration des représentations des sorties du modèle.

Tableau 6.3 Exemple de reformulations des questions par les acteurs au cours de la démarche. Seules les deux premières questions ont pu être traitées dans la durée de l'étude.

Question de l'équipe de recherche	Reformulation par les acteurs
Quelles seront les pertes économiques liées au changement climatique à l'échelle de l'exploitation ?	De combien d'euros doit augmenter le prix vrac pour compenser la perte de rendement, à produit brut constant ?
Pour chaque cépage paramétré dans le modèle, quelles seront les dates des stades phénologiques sous les différents scénarios climatiques ?	De combien de jours doit-on décaler le cycle phénologique pour retrouver les mêmes conditions climatiques pendant la maturation des baies ?
Dans quelle mesure l'apport de matière organique permet d'accroître le réservoir utile ?	De combien doit être le réservoir utile du sol pour maintenir le rendement ? L'augmentation du taux de matière organique dans le sol peut-il combler cet écart ?

4.2 S'adapter ou se transformer ?

Au cours de son histoire, le secteur viticole languedocien a démontré sa capacité à s'adapter à de nombreuses crises (Hannin et al., 2010) : phylloxera en 1868, surproduction en 1910, puis de nouveau dans les années 70. Dans les années 1980, il a connu un grand remaniement, tant quantitatif que qualitatif. C'est une véritable transformation du vignoble qui s'est opérée avec l'introduction de cépages améliorateurs, la maîtrise du rendement et de la vinification. Le changement climatique est la nouvelle crise à laquelle le secteur viticole doit faire face (Santillán et al., 2019). Cependant, les chemins pour s'y adapter sont nombreux (Aigrain et al., 2016). Or selon la définition de certains scientifiques⁹, l'adaptation désigne « *une réaction à un stress ou à une perturbation [...], qui ne remet pas en cause l'essentiel des valeurs fondamentales du*

⁹D'après un article de Raphaël Mathevet (CNRS), François Bousquet (CIRAD) et Olivier Barreteau (INRAE) publié dans le journal « *The conversation* » en mai 2020. <https://agritrop.cirad.fr/596058/1/596058.pdf>

« système, lequel conserve ses grandes caractéristiques ». La question est désormais de savoir si l'adaptation seule pourra répondre aux enjeux viticoles actuels, ou bien si une transformation sera nécessaire (Figure 6.7). La transformation, quant à elle, *« découle du constat que le fonctionnement du système n'est plus tenable, que ce soit pour des raisons socio-économiques ou écologiques, et qu'il faut en changer »*. Plusieurs éléments incitent le secteur viticole à la transformation afin d'inclure ses réflexions et actions pour l'adaptation au changement climatique dans un contexte plus large : la réduction de l'usage des pesticides, la préservation de la biodiversité, la transmission des exploitations agricoles, etc.

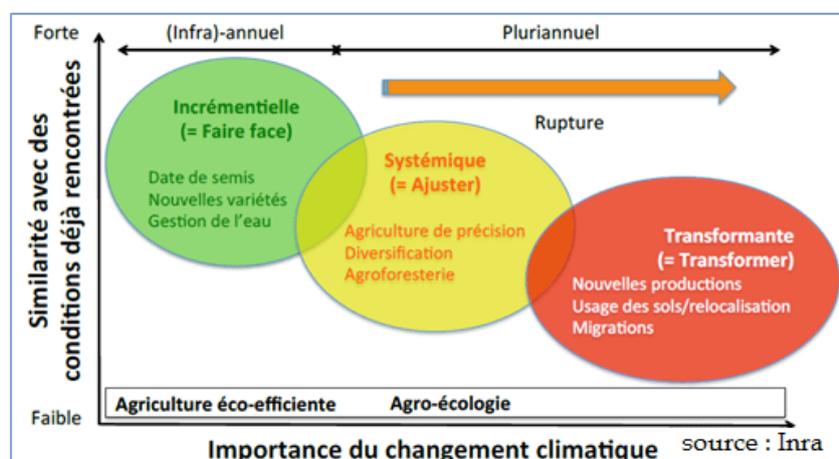


Figure 6.7 Différents niveaux d'adaptation au changement climatique en fonction des connaissances déjà acquises et en fonction de l'ampleur du changement climatique. Source : INRAE, adapté de Thornton et al. (2014).

L'étude de l'adaptation au changement climatique peut être un moteur de cette transformation, sous certaines conditions. D'abord, ces études doivent intégrer une réflexion globale et concertée. Sur l'exemple de la gestion de l'eau, Bernard Rousseau¹⁰ souligne que l'enjeu est *« de ne pas réduire la question des changements climatiques à des problèmes ponctuels et locaux de stockages d'eau, mais bien d'engager un processus de réflexion globale de gestion de l'eau dans un modèle agricole gouverné par le climat à venir »*. Les méthodes à mettre en place pour relever ce défi nécessiteront les efforts communs de plusieurs disciplines (climatologie, hydrologie, sociologie, agronomie, etc.) et de l'implication des acteurs, à la fois politiques et techniques. Ensuite, l'évaluation de systèmes adaptés au changement climatique doit aller au-delà de l'évaluation des pertes (ou accroissement) de rendement. Les services fournis par l'agriculture sont potentiellement

¹⁰Billet de blog paru dans le Monde diplomatique en octobre 2018 « Eau, climat : les défis de l'adaptation de l'agriculture »
<https://blog.mondediplo.net/eau-climat-les-defis-de-l-adaptation-de-l>

nombreux (Maraux et al., 2013). La production alimentaire est un de ces services mais pas le seul. Ainsi, les pertes de rendement pourraient être acceptables pour les viticulteurs à condition qu'ils soient rémunérés pour d'autres services. Des exemples ont été donnés en atelier : « à terme il faudra s'adapter à des rendements faibles, [...] les vignes sont aussi des remparts à la propagation des incendies, on pourrait être rémunéré pour cela, pour l'entretien du paysage ». Les études sur la transition agroécologique tendent à prendre en compte les multiples aspects agronomiques, économiques, environnementaux et sociaux d'un système agricole (HLPE, 2019). Il existe des synergies entre transition agroécologique et adaptation au changement climatique dont l'étude combinée permettrait de concevoir les transformations nécessaires des systèmes agricoles (Sinclair et al., 2019). Dans ce cadre, cette thèse illustre comment le travail conjoint des modélisateurs et des acteurs d'un territoire, a fait naître des réflexions, individuelles et collectives, sur les multiples enjeux présents au sein d'un système complexe.

Conclusion et Perspectives

Ce travail de thèse propose et met en œuvre une démarche de co-construction et d'évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique au sein d'un bassin versant viticole. Cette démarche articule une approche participative avec une approche de modélisation pour proposer des stratégies spatialisées prenant en compte le contexte local (climat, sol, ressources en eau, aires d'appellations, pratiques). Elle a permis de montrer qu'il existe des marges de manœuvre pour l'adaptation de la viticulture au changement climatique, au travers de la combinaison de leviers d'adaptation. En effet, les effets cumulés de plusieurs leviers d'adaptation, diversement répartis dans le paysage, permettent de réduire les pertes de rendement dues au changement climatique pour la majorité des systèmes viticoles (irrigués/non irrigués, AOP/IGP, sols profonds/sols superficiels). Au cours d'une série de cinq ateliers participatifs, les acteurs locaux et régionaux ont pris part à la construction d'un modèle numérique, à l'élaboration de stratégies d'adaptation et d'indicateurs d'évaluation, à la discussion des résultats du modèle. La participation a permis une communication directe des résultats de simulation ainsi que leur enrichissement par des indicateurs qualitatifs, sur la faisabilité et la souhaitabilité des leviers d'adaptation, et par des indicateurs quantitatifs sur le ratio coût/bénéfice des stratégies d'adaptation.

L'adaptation au changement climatique est un défi majeur pour l'ensemble du secteur agricole. L'approche proposée dans cette thèse n'est pas spécifique à la viticulture et a un intérêt pour les systèmes agricoles en général. D'abord, elle permet la mise à disposition, par l'intermédiaire des chercheurs, d'informations globales sur le changement climatique (scénarios climatiques et impacts attendus) à une échelle locale pour réfléchir à des adaptations réalistes. Nous avons cependant noté que les projections climatiques régionales mériteraient d'être mieux articulées avec les perceptions des acteurs (événements extrêmes, climat local) pour explorer une plus vaste gamme de climats possibles et donc construire et évaluer des stratégies d'adaptation de manière plus robuste. Ensuite, les modèles quantitatifs sont des outils intéressants pour se projeter dans le futur et surtout pour comparer les adaptations entre elles. Cependant, les modèles, et plus particulièrement ceux concernant les cultures pérennes, peinent à représenter la diversité des systèmes de culture, des impacts du changement climatique et des adaptations envisagées (variétés, types de taille, amélioration de la qualité des sols). Cette thèse identifie des

pistes de développement à l'attention des modélisateurs, tout en proposant de recourir à des connaissances expertes pour évaluer les effets d'un plus large spectre d'adaptations.

Enfin, les systèmes agricoles seront amenés à s'adapter également à l'évolution du contexte socio-économique. Réfléchir à l'adaptation au changement climatique est une première étape mais elle ne suffit pas. C'est pourquoi, une fois la combinaison de leviers techniques à mettre en place identifiée, il faut se poser la question du contexte favorisant leur application (réglementation, subvention, prix du marché, etc.) ainsi que leur pertinence vis-à-vis des enjeux sociaux et environnementaux actuels (réduction de l'usage des produits phytosanitaires, préservation de la biodiversité, transmission des exploitations agricoles, etc.). En faisant la démonstration de la pertinence d'une représentation spatiale du paysage agricole et de ses évolutions, et en menant à bien une évaluation quantitative impliquant les acteurs, cette thèse ouvre des perspectives, autant pour les scientifiques que pour les professionnels, pour identifier les nécessaires transformations des systèmes agricoles au prisme de leurs multiples fonctions actuelles et à venir.



Illustration parue dans le « *Courrier de l'environnement de l'INRA* » n° 66, avril 2016

Références bibliographiques

Bibliographie

- ADEME and I-CARE and Consult (2016). Sols et Changement climatique : Impacts et Adaptation. Etat des lieux de la recherche et identification de pistes de recherche. Technical report. [15](#)
- ADEME and Météo France (2011). Changement climatique au 20ème siècle en Languedoc-Roussillon. Données et références. [65](#)
- Adger, W., Arnell, N. W., and Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15(2):77–86, DOI: [10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005](#). [14](#)
- Affholder, F., Tiftonell, P., Corbeels, M., Roux, S., Motisi, N., Tixier, P., and Wery, J. (2012). Ad Hoc Modeling in Agronomy: What Have We Learned in the Last 15 Years? *Agronomy Journal*, 104(3):735–748, DOI: [10.2134/agronj2011.0376](#). [91](#)
- Agrete (2018). Étude sur l'âge du vignoble et des vignesarrachées dans le bassin viticoleLanguedoc-Roussillon. Technical Report 8, DRAAF Occitanie, Toulouse. [56](#)
- Agrete (2021). Mémento 2021 de la statistique agricole - Occitanie. Technical report. [64](#)
- Aigrain, P., Brugière, F., Duchêne, E., de Cortazar-Atauri, I. G., Gautier, J., Giraud-Héraud, E., Hannin, H., Ollat, N., and Touzard, J.-M. (2016). Work of prospective on the adaptation of the viticulture to climate change: Which series of events could support various adaptation strategies? / 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*, 7:03016, DOI: [10.1051/bioconf/20160703016](#). [x](#), [20](#), [114](#), [149](#), [150](#), [161](#)
- Alcamo, J. (2009). *Environmental Futures, Volume 2 - 1st Edition*. Elsevier edition. [25](#), [134](#), [148](#)
- Alikadic, A., Pertot, I., Eccel, E., Dolci, C., Zarbo, C., Caffarra, A., De Filippi, R., and 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, DOI: [10.1016/j.agrformet.2019.02.030](#). [18](#)
- Allain, S., Ndong, G. O., Lardy, R., and Leenhardt, D. (2018a). Integrated assessment of

- four strategies for solving water imbalance in an agricultural landscape. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(6):60, DOI: 10.1007/s13593-018-0529-z. [12](#), [85](#), [86](#)
- Allain, S., Plumecocq, G., and Leenhardt, D. (2018b). Spatial aggregation of indicators in sustainability assessments: Descriptive and normative claims. *Land Use Policy*, 76:577–588, DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.02.038. [2](#)
- Allain, S., Plumecocq, G., and Leenhardt, D. (2020). Linking deliberative evaluation with integrated assessment and modelling: A methodological framework and its application to agricultural water management. *Futures*, 120:102566, DOI: 10.1016/j.futures.2020.102566. [160](#)
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith (1998). *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements* -. Number 56 in FAO Irrigation and Drainage Paper. FAO, Rome. [68](#), [77](#), [94](#)
- Alonso, A. D. and Liu, Y. (2013). Climate Change in the Wine Sector of an Ultra-Peripheral European Region: A Case Study. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 37(3):291–315, DOI: 10.1080/10440046.2012.712089. [43](#), [57](#)
- Alonso Ugaglia, A. and Peres, S. (2017). Knowledge Dynamics and Climate Change Issues in the Wine Industry: A Literature Review. *Journal of Innovation Economics Management*, n° 24(3):105–125. [47](#)
- Amendola, C., Montagnoli, A., Terzaghi, M., Trupiano, D., Oliva, F., Baronti, S., Miglietta, F., Chiatante, D., and Scippa, G. S. (2017). Short-term effects of biochar on grapevine fine root dynamics and arbuscular mycorrhizae production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239:236–245, DOI: 10.1016/j.agee.2017.01.025. [45](#)
- Andersen, D. F., Richardson, G. P., and Vennix, J. A. M. (1997). Group model building: Adding more science to the craft. *System Dynamics Review*, 13(2):187–201. [24](#)
- Andrieux, P., Biarnès, A., Andrieux, P., Biarnes, A., Barbier, J. M., Bonnefoy, A., Compagnone, C., Delpuech, X., Gary, C., and Metay, A. (2015). SP3A: Spatialisation de pratiques agricoles adaptées et acceptables. Technical report. [66](#), [67](#), [93](#)
- Aparicio, J., Tenza-Abril, A. J., Borg, M., Galea, J., and Candela, L. (2019). Agricultural irrigation of vine crops from desalinated and brackish groundwater under an economic perspective. A case study in Siggiewi, Malta. *Science of The Total Environment*, 650:734–740, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.059. [44](#), [50](#)
- Audouin, E., Bergez, J.-E., Therond, O., Padie, F., Cappelle, K., and Bonin, S. (2018). TATA-BOX action-Research project: processes and tools for territorial design consecrated to agroecological transition. *Agronomie, Environnement and Sociétés*, 8(2):99. [149](#)
- Baccar, M., Bergez, J.-E., Couture, S., Sekhar, M., Ruiz, L., and Leenhardt, D.

- (2021). Building Climate Change Adaptation Scenarios with Stakeholders for Water Management: A Hybrid Approach Adapted to the South Indian Water Crisis. *Sustainability*, 13(15):8459, DOI: 10.3390/su13158459. [23](#), [148](#), [149](#)
- Banos, A. (2013). Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et SHS. *Géographie, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne*. [x](#), [157](#), [158](#)
- Bardsley, D. K., Palazzo, E., and Pütz, M. (2018). Regional path dependence and climate change adaptation: A case study from the McLaren Vale, South Australia. *Journal of Rural Studies*, 63:24–33, DOI: 10.1016/j.jrurstud.2018.08.015. [20](#), [51](#), [54](#), [114](#)
- Barnett, J. and O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 20(2):211–213, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2009.11.004. [14](#)
- Baronti, S., Vaccari, F. P., Miglietta, F., Calzolari, C., Lugato, E., Orlandini, S., Pini, R., Zulian, C., and Genesio, L. (2014). Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy*, 53:38–44, DOI: 10.1016/j.eja.2013.11.003. [45](#)
- Battaglini, A., Barbeau, G., Bindi, M., and Badeck, F.-W. (2009). European winegrowers' perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change*, 9(2):61–73, DOI: 10.1007/s10113-008-0053-9. [37](#), [53](#), [54](#), [57](#)
- Belliveau, S., Smit, B., and Bradshaw, B. (2006). Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change*, 16(4):364–378, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.003. [36](#), [42](#), [43](#)
- Benoît, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A. C., Galli, M., Lardon, S., Rapey, H., Thenail, C., and Bonari, E. (2012). Landscape agronomy: A new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 27(10):1385–1394, DOI: 10.1007/s10980-012-9802-8. [16](#), [27](#)
- Bergez, J., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., and Sadok, W. (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy*, 32(1):3–9, DOI: 10.1016/j.eja.2009.06.001. [23](#)
- Bergqvist, J., Dokoozlian, N., and 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. page 7. [102](#)
- Bertrand, N., Roux, S., Forey, O., Guinet, M., and Wery, J. (2018). Simulating plant water stress dynamics in a wide range of bi-specific agrosystems in a region using the BISWAT model. *European Journal of Agronomy*, 99:116–128, DOI: 10.1016/j.eja.2018.06.001. [74](#)
- Bindi, M., Bellesi, S., Orlandini, S., Fibbi, L., Moriondo, M., and Sinclair, T. (2005).

- Influence of Water Deficit Stress on Leaf Area Development and Transpiration of Sangiovese Grapevines Grown in Pots. page 6. [19](#)
- Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S., and Miglietta, F. (1996). Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research*, 7:213–224, DOI: 10.3354/cr007213. [31](#), [36](#)
- Bindi, M., Fibbi, L., and Miglietta, F. (2001). Free Air CO₂ Enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.): II. Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *European Journal of Agronomy*, 14(2):145–155, DOI: 10.1016/S1161-0301(00)00093-9. [13](#), [19](#), [31](#), [50](#), [52](#), [106](#)
- Bindi, M., Miglietta, F., Gozzini, B., Orlandini, S., and Seghi, L. (1997). A simple model for simulation of growth and development in grapevine (*Vitis vinifera* L.) .I.Model description. [74](#)
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., and Plantureux, S. (2008). Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 28(1):139–149, DOI: 10.1051/agro:2007052. [12](#)
- Boiffin, J. (2004). Territoire : agronomie, géographie, écologie, où en est-on ? Le point de vue d'un chercheur agronome. *Natures Sciences Societes*, Vol. 12(3):307–309. [64](#)
- Boiffin, J., Benoît, M., Bail, M., papy, F., and Stengel, P. (2014). Agronomy, land, and territory: Working on and for territorial development, the stakes for agronomy. *Cahiers Agricultures*, 23:72–83, DOI: 10.1684/agr.2014.0688. [2](#), [21](#)
- Bois, B., Zito, S., and Calonnec, A. (2017). Climate vs grapevine pests and diseases worldwide: The first results of a global survey. *OENO One*, 51(2-3):133–139, DOI: 10.20870/oeno-one.2016.0.0.1780. [18](#), [109](#)
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 3):7280–7287, DOI: 10.1073/pnas.082080899. [25](#)
- Bonada, M., Buesa, I., Moran, M. A., and Sadras, V. O. (2018). Interactive effects of warming and water deficit on Shiraz vine transpiration in the Barossa Valley, Australia. *Oeno One*, 52(2), DOI: 10.20870/oeno-one.2018.52.2.2141. [19](#), [43](#), [50](#), [52](#)
- Bonfils, P. (1993). *Carte Pédologique de France à Moyenne Échelle : Lodève L-22 : Notice Explicative, Carte 1/100 000*. Carte Pédologique de France. INRA, Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, Olivet. [66](#), [87](#)
- Bonnefoy, C. (2013). Observation et modélisation spatiale de la température dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique. page 322. [21](#)

- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., and Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7):723–739, DOI: 10.1016/j.futures.2005.12.002. [x](#), [148](#), [149](#)
- Boursiquot, J.-M. (2018). Cépages patrimoniaux : états des lieux et matériel végétal disponible. In *Matinée d'information Technique Du Syndicat de l'AOC Languedoc*, Montpellier, France. [20](#)
- Brisson, N. and Levrault, F. (2010). *Livre vert du projet CLIMATOR: 2007-2010 changement climatique, agriculture et forêt en France simulations d'impacts sur les principales espèces*. ADEME, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Angers. [15](#)
- Buesa, I., Ballester, C., Mirás-Avalos, J. M., and Intrigliolo, D. S. (2020). Effects of leaning grapevine canopy to the West on water use efficiency and yield under Mediterranean conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295:108166, DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108166. [56](#)
- Buesa, I., Caccavello, G., Basile, B., Merli, M. C., Poni, S., Chirivella, C., and Intrigliolo, D. S. (2019). Delaying berry ripening of Bobal and Tempranillo grapevines by late leaf removal in a semi-arid and temperate-warm climate under different water regimes: Late leaf removal effects in Bobal and Tempranillo. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 25(1):70–82, DOI: 10.1111/ajgw.12368. [46](#)
- Caffarra, A. and Eccel, E. (2010). Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv. Chardonnay. *International Journal of Biometeorology*, 54(3):255–267, DOI: 10.1007/s00484-009-0277-5. [74](#)
- Caffarra, A. and Eccel, E. (2011). Projecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine in a mountain area. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 17(1):52–61, DOI: 10.1111/j.1755-0238.2010.00118.x. [18](#), [31](#), [85](#), [107](#)
- Calanca, P., Bolius, D., Weigel, A. P., and Liniger, M. A. (2011). Application of long-range weather forecasts to agricultural decision problems in Europe. *The Journal of Agricultural Science*, 149(1):15–22, DOI: 10.1017/S0021859610000729. [8](#)
- Caravia, L., Collins, C., Petrie, P., and Tyerman, S. (2016). Application of shade treatments during Shiraz berry ripening to reduce the impact of high temperature: Shade reduces impact of high temperature on Shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 22(3):422–437, DOI: 10.1111/ajgw.12248. [42](#), [118](#)
- Caron, P. and Cheylan, J.-P. (2005). Donner sens à l'information géographique pour accompagner les projets de territoire : cartes et représentations spatiales comme supports d'itinéraires croisés. *Géocarrefour*, 80(2):111–122, DOI: 10.4000/geocarrefour.1031. [75](#)

- Carter, T. R. (1996). Assessing Climate Change Adaptations: The IPCC Guidelines. In Smith, J. B., Bhatti, N., Menzhulin, G. V., Benioff, R., Campos, M., Jallow, B., Rijsberman, F., Budyko, M. I., and Dixon, R. K., editors, *Adapting to Climate Change: An International Perspective*, pages 27–43. Springer New York, New York, NY, DOI: 10.1007/978-1-4613-8471-7_4. [12](#), [30](#), [36](#), [51](#), [148](#)
- Carvalho, L. C., Coito, J. L., Gonçalves, E. F., Chaves, M. M., and Amâncio, S. (2016). Differential physiological response of the grapevine varieties Touriga Nacional and Trincadeira to combined heat, drought and light stresses. *Plant Biology (Stuttgart, Germany)*, 18 Suppl 1:101–111, DOI: 10.1111/plb.12410. [31](#)
- Carvalho, L. C., Coito, J. L., Gonçalves, E. F., Lopes, C., and Amâncio, S. (2018). Physiological and agronomical responses to environmental fluctuations of two Portuguese grapevine varieties during three field seasons. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 33(1):1–14, DOI: 10.1051/ctv/20183301001. [48](#)
- Carvalho-Santos, C., Nunes, J. P., Monteiro, A. T., Hein, L., and Honrado, J. P. (2016). Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal: Impacts of Land Cover and Future Climate on Hydrological Services. *Hydrological Processes*, 30(5):720–738, DOI: 10.1002/hyp.10621. [39](#), [53](#), [85](#)
- Catarino, R., Therond, O., Berthomier, J., Miara, M., Mérot, E., Misslin, R., Vanhove, P., Villerd, J., and Angevin, F. (2021). Fostering local crop-livestock integration via legume exchanges using an innovative integrated assessment and modelling approach based on the MAELIA platform. *Agricultural Systems*, 189:103066, DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103066. [23](#)
- Caubel, J., García de Cortázar-Atauri, I., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., and Graux, A.-I. (2015). Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207:94–106, DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.02.005. [19](#)
- Celette, F., Ripoché, A., and Gary, C. (2010). WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management*, 97(11):1749–1759, DOI: 10.1016/j.agwat.2010.06.008. [20](#), [56](#), [73](#), [74](#), [90](#), [91](#), [93](#)
- CGEDD and CGAAER (2020). Changement climatique, eau, agriculture - Quelles trajectoires d'ici 2050 ? Rapport interministériel CGAAER n° 19056 et CGEDD n° 12819-01. [15](#)
- Chen, H. (2018). *VennDiagram: Generate High-Resolution Venn and Euler Plots*. [33](#)

- Chopin, P., Blazy, J.-M., Guindé, L., Wery, J., and Doré, T. (2017). A framework for designing multi-functional agricultural landscapes: Application to Guadeloupe Island. *Agricultural Systems*, 157:316–329, DOI: 10.1016/j.agsy.2016.10.003. [16](#)
- Christ, K. L. and Burritt, R. L. (2013). Critical environmental concerns in wine production: An integrative review. *Journal of Cleaner Production*, 53:232–242, DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.04.007. [18](#)
- Chrysargyris, A., Xylia, P., Litskas, V., Mandoulaki, A., Antoniou, D., Boyias, T., Stavrinides, M., and Tzortzakis, N. (2018). Drought stress and soil management practices in grapevines in Cyprus under the threat of climate change. *Journal of Water and Climate Change*, DOI: 10.2166/wcc.2018.135. [45](#), [52](#), [55](#)
- Cirigliano, P., Vincenza Chiriaco, M., CMCC – Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Nunez, A., Universidad Autonoma de Chihuahua, Dal Monte, G., CREA-CMC Consiglio per la ricerca in agricoltura e l’analisi dell’economia agraria, Labagnara, T., and CREA-VE Consiglio per la ricerca in agricoltura e l’analisi dell’economia agraria (2017). Efecto combinado de la aplicación de riego y compost sobre la composición de la baya Montepulciano en un entorno volcánico de la región de Lacio (Italia central). *Ciencia e investigación agraria*, 44(2):195–206, DOI: 10.7764/rcia.v44i2.1691. [43](#), [44](#), [52](#), [55](#)
- Clavel, L., Soudais, J., Baudet, D., and Leenhardt, D. (2011). Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy*, 28(1):57–65, DOI: 10.1016/j.landusepol.2010.05.001. [2](#)
- Clingeffer, P. R. (2010). Plant management research: Status and what it can offer to address challenges and limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16(s1):25–32, DOI: 10.1111/j.1755-0238.2009.00075.x. [41](#), [48](#)
- ComMod, C. (2005). La modélisation comme outil d’accompagnement. *Natures Sciences Sociétés*, 13(2):165–168, DOI: 10.1051/nss:2005023. [159](#)
- Concepción Ramos, M. (2016). Soil losses in rainfed Mediterranean vineyards under climate change scenarios. The effects of drainage terraces. *AIMS Agriculture and Food*, 1(2):124–143, DOI: 10.3934/agrfood.2016.2.124. [41](#)
- Conway, D., Nicholls, R. J., Brown, S., Tebboth, M. G. L., Adger, W. N., Ahmad, B., Biemans, H., Crick, F., Lutz, A. F., De Campos, R. S., Said, M., Singh, C., Zaroug, M. A. H., Ludi, E., New, M., and Wester, P. (2019). The need for bottom-up assessments of climate risks and adaptation in climate-sensitive regions. *Nature Climate Change*, 9(7):503–511, DOI: 10.1038/s41558-019-0502-0. [144](#), [160](#)
- Coordination SUD (2015). Les notes de la CDD : Systèmes d’alerte précoce et information climatique, une clé pour la résilience à long-terme. [15](#)

- Corbeels, M., Berre, D., Rusinamhodzi, L., and Lopez-Ridaura, S. (2018). Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options? *Agricultural and Forest Meteorology*, 256–257:46–52, DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.02.026. 57, 108, 158
- Costa, R., Fraga, H., Malheiro, A. C., and Santos, J. A. (2015). Application of crop modelling to portuguese viticulture: Implementation and added-values for strategic planning. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 30(1):29–42, DOI: 10.1051/ctv/20153001029. 90
- Cradock-Henry, N. A. and Frame, B. (2021). Balancing scales: Enhancing local applications of adaptation pathways. *Environmental Science and Policy*, 121:42–48, DOI: 10.1016/j.envsci.2021.04.001. 113
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M. A., Lionello, P., Llasat, M. C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M. N., and Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11):972–980, DOI: 10.1038/s41558-018-0299-2. 10
- Crespy, A. (1992). *Viticulture d’aujourd’hui. 2ème édition*. Lavoisier edition. 102
- Cunningham, S. C., Mac Nally, R., Baker, P. J., Cavagnaro, T. R., Beringer, J., Thomson, J. R., and Thompson, R. M. (2015). Balancing the environmental benefits of reforestation in agricultural regions. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 17(4):301–317, DOI: 10.1016/j.ppees.2015.06.001. 57
- da Silva, J. R., Rodrigues, W. P., Ferreira, L. S., Bernado, W. d. P., Paixão, J. S., Patterson, A. E., Ruas, K. F., Viana, L. H., de Sousa, E. F., Bressan-Smith, R. E., Poni, S., Griffin, K. L., and Campostrini, E. (2018). Deficit irrigation and transparent plastic covers can save water and improve grapevine cultivation in the tropics. *Agricultural Water Management*, 202:66–80, DOI: 10.1016/j.agwat.2018.02.013. 43
- D’Aquino, P. (2016). TerriStories, un jeu au service de l’invention collective dans les politiques publiques. *Animation, territoires et pratiques socioculturelles*, (10):71–80. 23
- de C. Teixeira, A., Tonietto, J., Pereira, G., Hernandez, F., Angelotti, F., and Lopes, H. (2014). AGRO-CLIMATIC SUITABILITY DELIMITATION FOR TABLE AND WINE GRAPE CROPS UNDER IRRIGATION CONDITIONS IN NORTHEASTERN BRAZIL. *Acta Horticulturae*, (1038):277–286, DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1038.33. 53, 134
- De Micco, V., Zalloni, E., Battipaglia, G., Erbaggio, A., Scognamiglio, P., Caputo, R., and Cirillo, C. (2018). Rootstock effect on tree-ring traits in grapevine under a climate

- change scenario. *IAWA Journal*, 39(2):145–155, DOI: 10.1163/22941932-20170199. 40
- de Rességuier, L., Mary, S., Le Roux, R., Petitjean, T., Quénot, H., and 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*, 0, DOI: 10.3389/fpls.2020.00515. 156
- Delay, E., Piou, C., and Quenol, H. (2015). The mountain environment, a driver for adaptation to climate change. *Land Use Policy*, 48:51–62, DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.05.008. 20, 25, 32, 39, 54, 56, 74, 84, 85, 109, 134
- Delmotte, S., Barbier, J.-M., Mouret, J.-C., Le Page, C., Wery, J., Chauvelon, P., Sandoz, A., and Lopez Ridaura, S. (2016). Participatory integrated assessment of scenarios for organic farming at different scales in Camargue, France. *Agricultural Systems*, 143:147–158, DOI: 10.1016/j.agry.2015.12.009. 71
- Delmotte, S., Couderc, V., Mouret, J.-C., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J.-M., and Hossard, L. (2017). From stakeholders narratives to modelling plausible future agricultural systems. Integrated assessment of scenarios for Camargue, Southern France. *European Journal of Agronomy*, 82:292–307, DOI: 10.1016/j.eja.2016.09.009. 85, 134
- Delmotte, S., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J.-M., and Wery, J. (2013). Prospective and participatory integrated assessment of agricultural systems from farm to regional scales: Comparison of three modeling approaches. *Journal of Environmental Management*, 129:493–502, DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.001. 85
- Delpuech, X. and Metay, A. (2018). Adapting cover crop soil coverage to soil depth to limit competition for water in a Mediterranean vineyard. *European Journal of Agronomy*, 97:60–69, DOI: 10.1016/j.eja.2018.04.013. 90
- Département Hérault (2019). Hérault Irrigation, Schéma départemental, 2018 - 2030. Technical report, <https://fr.calameo.com/read/0017574769e5f76918e87>, Montpellier. 1, 20, 64, 133
- Dequin, S., Escudier, J.-L., Bely, M., Noble, J., Albertin, W., Masneuf-Pomarède, I., Marullo, P., Salmon, J.-M., and Sablayrolles, J. M. (2017). How to adapt winemaking practices to modified grape composition under climate change conditions. *OENO One*, 51(2):205–214, DOI: 10.20870/oeno-one.2017.51.2.1584. 47
- Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R., and Pielke, R. (2009). Do We Need Better Predictions to Adapt to a Changing Climate? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(13):111–112, DOI: 10.1029/2009E0130003. 11
- Destrac-Irvine, A. and van Leeuwen, C. (2016). The VitAdapt project : Extensive phenotyping of a wide range of varieties in order to optimize the use of genetic diversity

- within the *Vitis vinifera* species as a tool for adaptation to a changing environment. In *Proceedings : Sustainable Grape and Wine Production in the Context of Climate Change*, pages 165–171, Bordeaux, France. [20](#)
- Diffenbaugh, N. S., White, M. A., Jones, G. V., and Ashfaq, M. (2011). Climate adaptation wedges: A case study of premium wine in the western United States. *Environmental Research Letters*, 6(2):024024, DOI: 10.1088/1748-9326/6/2/024024. [56](#)
- dos Santos, T. P., Lopes, C. M., Lucília Rodrigues, M., de Souza, C. R., Ricardo-da-Silva, J. M., Maroco, J. P., Pereira, J. S., and Manuela Chaves, M. (2007). Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Scientia Horticulturae*, 112(3):321–330, DOI: 10.1016/j.scienta.2007.01.006. [44](#)
- Duchene, E. (2016). How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change? *OENO One*, 50(3):113–124, DOI: 10.20870/oenone.2016.50.3.98. [40](#), [107](#)
- Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., and Merdinoglu, D. (2010). The challenge of adapting grapevine varieties to climate change. *Climate Research*, 41(3):193–204, DOI: 10.3354/cr00850. [31](#)
- Dunn, M. R., Lindsay, J. A., and Howden, M. (2015). Spatial and temporal scales of future climate information for climate change adaptation in viticulture: A case study of User needs in the Australian winegrape sector. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 21(2):226–239, DOI: 10.1111/ajgw.12138. [114](#)
- Duru, M., Felten, B., Theau, J. P., and Martin, G. (2012). A modelling and participatory approach for enhancing learning about adaptation of grassland-based livestock systems to climate change. *Regional Environmental Change*, 12(4):739–750, DOI: 10.1007/s10113-012-0288-3. [85](#)
- Eddelbuettel, D., Francois, R., and Bachmeier, a. L. (2020). RInside: C++ Classes to Embed R in C++ (and C) Applications. [95](#)
- Etienne, M., editor (2014). *Companion Modelling: A Participatory Approach to Support Sustainable Development*. Springer Netherlands, DOI: 10.1007/978-94-017-8557-0. [23](#)
- Etienne, M., Toit, D. D., and Pollard, S. (2008). ARDI: A co-construction method for participatory modelling in natural resources management. page 8. [23](#)
- Fabre, J.-C., Rabotin, M., Crevoisier, D., Libres, A., Dagès, C., Moussa, R., Lagacherie, P., Raclot, D., and Voltz, M. (2013). OpenFLUID: An open-source software environment for modelling fluxes in landscapes. In *EGU General Assembly Conference*

Abstracts, volume 15. [95](#), [115](#)

FAO, editor (2013). *Climate-Smart Agriculture Sourcebook*. FAO, Rome. [15](#)

Fatima, Z., Ahmed, M., Hussain, M., Abbas, G., Ul-Allah, S., Ahmad, S., Ahmed, N., Ali, M. A., Sarwar, G., ul Haque, E., Iqbal, P., and Hussain, S. (2020). The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. *Scientific Reports*, 10(1):18013, DOI: [10.1038/s41598-020-74740-3](#). [11](#)

Fernández-Mena, H., Frey, H., Celette, F., Garcia, L., Barkaoui, K., Hossard, L., Naulleau, A., Métral, R., Gary, C., and Metay, A. (2021). Spatial and temporal diversity of service plant management strategies across vineyards in the south of France. Analysis through the Coverage Index. *European Journal of Agronomy*, 123:126191, DOI: [10.1016/j.eja.2020.126191](#). [118](#)

Ferrand, N. (2006). Comment évaluer la contribution de la modélisation participative au développement durable ? page 20. [144](#)

Ferrise, R., Trombi, G., Moriondo, M., and Bindi, M. (2016). Climate Change and Grapevines: A Simulation Study for the Mediterranean Basin. *Journal of Wine Economics*, 11(1):88–104, DOI: [10.1017/jwe.2014.30](#). [113](#)

Field, C. and Barros, V. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, volume 1132. Cambridge Univ. Press, New York, NY, [field, c.b., v.r. barros, d.j. dokken, k.j. mach, m.d. mastrandrea, t.e. bilir, m. chatterjee, k.l. ebi, y.o. estrada, r.c. genova, b. girma, e.s. kissel, a.n. levy, s. maccracken, p.r. mastrandrea, and l.l. white (eds.)] edition. [14](#)

Flexas, J., GalmãS, J., Gallã, A., GulãAs, J., Pou, A., Ribas-Carbo, M., TomãS, M., and Medrano, H. (2010). Improving water use efficiency in grapevines: Potential physiological targets for biotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16:106–121, DOI: [10.1111/j.1755-0238.2009.00057.x](#). [45](#)

Fraga, H., Atauri, I. G. d. C., Malheiro, A. C., and Santos, J. A. (2016). Modelling climate change impacts on viticultural yield, phenology and stress conditions in Europe. *Global Change Biology*, 22(11):3774–3788, DOI: [10.1111/gcb.13382](#). [85](#), [107](#), [113](#), [153](#)

Fraga, H., Costa, R., Moutinho-Pereira, J., Correia, C. M., Dinis, L.-T., Goncalves, I., Silvestre, J., Eiras-Dias, J., Malheiro, A. C., and Santos, J. A. (2015). Modeling Phenology, Water Status, and Yield Components of Three Portuguese Grapevines Using the STICS Crop Model. *American Journal of Enology and Viticulture*, 66(4):482–491, DOI: [10.5344/ajev.2015.15031](#). [107](#)

Fraga, H., García de Cortázar Atauri, I., and Santos, J. (2018). Viticultural irrigation

- demands under climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management*, 196:66–74, DOI: 10.1016/j.agwat.2017.10.023. [43](#), [44](#), [53](#), [54](#), [56](#), [108](#), [113](#)
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., and Santos, J. A. (2012a). An overview of climate change impacts on European viticulture. *Food and Energy Security*, 1(2):94–110, DOI: 10.1002/fes3.14. [39](#)
- Fraga, H. and Santos, J. A. (2018). Vineyard mulching as a climate change adaptation measure: Future simulations for Alentejo, Portugal. *Agricultural Systems*, 164:107–115, DOI: 10.1016/j.agsy.2018.04.006. [46](#), [53](#), [113](#)
- Fraga, H., Santos, J. A., Malheiro, A. C., and Moutinho-Pereira, J. (2012b). CLIMATE CHANGE PROJECTIONS FOR THE PORTUGUESE VITICULTURE USING A MULTI-MODEL ENSEMBLE. page 10. [18](#), [31](#)
- FranceAgriMer (2020). Les chiffres de la filière viti-vinicole - Données statistiques 2009/2019. Technical report. [151](#)
- FranceAgriMer and CNIV (2016). Analyse des filières vitivinicoles des principaux pays producteurs dans le monde - France. Rapport de synthèse. [1](#), [64](#)
- Fuhrer, J., Smith, P., and Gobiet, A. (2014). Implications of climate change scenarios for agriculture in alpine regions — A case study in the Swiss Rhone catchment. *Science of The Total Environment*, 493:1232–1241, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.038. [39](#), [53](#)
- Galbreath, J. (2014). Climate Change Response: Evidence from the Margaret River Wine Region of Australia. *Business Strategy and the Environment*, 23(2):89–104, DOI: 10.1002/bse.1762. [41](#), [42](#), [51](#), [56](#)
- Gambetta, G. A., Herrera, J. C., Dayer, S., Feng, Q., Hochberg, U., and Castellarin, 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, DOI: 10.1093/jxb/eraa245. [17](#), [18](#)
- Garcia de Cortazar Atauri, I. (2006). *ADAPTATION DU MODELE STICS A LA VIGNE (Vitis vinifera L.). UTILISATION DANS LE CADRE D'UNE ETUDE D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE DE LA FRANCE*. PhD thesis, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIER. [18](#), [20](#), [73](#), [74](#), [153](#)
- Garcia De Cortazar Atauri, I., Duchêne, E., Destrac, A., Barbeau, G., De Resseguier, L., Lacombe, T., Parker, A. K., Saurin, N., and 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, DOI: 10.20870/oeno-one.2016.0.0.1622. [18](#), [85](#)

- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., and Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4):121–139, DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.01.006. [39](#)
- Gaudin, R. and Gary, C. (2012). Model-based evaluation of irrigation needs in Mediterranean vineyards. *Irrigation Science*, 30(5):449–459, DOI: 10.1007/s00271-012-0349-x. [44](#), [108](#)
- Gaudin, R., Kansou, K., Payan, J.-C., Pellegrino, A., and Gary, C. (2014). A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield. *OENO One*, 48(1):1, DOI: 10.20870/oeno-one.2014.48.1.1655. [1](#), [90](#), [98](#)
- Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Vitaliotou, M., Lalas, D. P., Theloudis, I., Giannoulaki, K. D., Dimopoulos, D., and Zavras, V. (2017). Climate change impacts and adaptation options for the Greek agriculture in 2021–2050: A monetary assessment. *Climate Risk Management*, 16:164–182, DOI: 10.1016/j.crm.2017.02.002. [56](#)
- Gil, P., Lobos, P., Durán, K., Olguín, J., Cea, D., and Schaffer, B. (2018). Partial root-zone drying irrigation, shading, or mulching effects on water savings, productivity and quality of ‘Syrah’ grapevines. *Scientia Horticulturae*, 240:478–483, DOI: 10.1016/j.scienta.2018.06.050. [43](#), [55](#)
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), DOI: 10.1029/2006GL025734. [1](#), [9](#)
- Giraud, T., Lambert, N., Hernangómez, D., overlap algorithm for labels, I. F. n., and wordcloud package), f. (2020). Cartography: Thematic Cartography. [95](#)
- Grantham, T. E., Merenlender, A. M., and Resh, V. H. (2010). Climatic influences and anthropogenic stressors: An integrated framework for streamflow management in Mediterranean-climate California, U.S.A. *Freshwater Biology*, 55(s1):188–204, DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02379.x. [50](#), [53](#), [133](#)
- Griggs, D. J. and Noguera, M. (2002). Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Weather*, 57(8):267–269. [8](#)
- Grimaldi (2018). *Is Agroforestry a Sound Strategy against Climatic Hazard for Grape and Wine Production ? Assessment of Microclimate Patterns within Agroforestry Vineyards*. PhD thesis, Université Toulouse 3 Sabatier, Toulouse. [109](#)
- Guilpart, N., Metay, A., and 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, DOI:

- 10.1016/j.eja.2013.11.002. [x](#), [1](#), [17](#), [74](#), [86](#), [91](#), [97](#), [98](#), [106](#), [152](#), [153](#)
- Haasnoot, M., Biesbroek, R., Lawrence, J., Muccione, V., Lempert, R., and Glavovic, B. (2020). Defining the solution space to accelerate climate change adaptation. *Regional Environmental Change*, 20(2):37, DOI: 10.1007/s10113-020-01623-8. [15](#), [113](#)
- Haasnoot, M., van Deursen, W. P. A., Guillaume, J. H. A., Kwakkel, J. H., van Beek, E., and Middelkoop, H. (2014). Fit for purpose? building and evaluating a fast, integrated model for exploring water policy pathways. *Environmental Modelling and Software*, 60:99–120, DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.05.020. [25](#)
- Habib, R., Lescourret, F., and Legay, J. M. (2001). Quels modeles pour la gestion des vergers ? In *Modelisation Des Agroecosystemes et Aide a La Decision / Malezieux Eric (Ed.), Trebuil Guy (Ed.), Jaeger Marc (Ed.)*, pages 173–185. CIRAD, Montpellier. [152](#)
- Hämäläinen, R. P., Miliszewska, I., and Voinov, A. (2020). Leadership in participatory modelling – Is there a need for it? *Environmental Modelling and Software*, 133:104834, DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104834. [24](#)
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., Zhi, L., Marquet, P. A., and Hijmans, R. J. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17):6907–6912. [11](#), [19](#), [31](#), [37](#), [39](#), [53](#), [54](#), [113](#), [134](#)
- Hannin, H., Couderc, J.-P., d’Hauteville, F., and Montaigne, E. (2010). *La vigne et le vin - Hervé Hannin, Jean-Pierre Couderc, François d’Hauteville, Etienne Montaigne*. Documentation française edition. [161](#)
- Hertig, E. and Trambly, Y. (2017). Regional downscaling of Mediterranean droughts under past and future climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 151:36–48, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.10.015. [10](#)
- HLPE (2019). Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. Technical report, Rome. [163](#)
- Hossard, L., Jeuffroy, M., Pelzer, E., Pinochet, X., and Souchere, V. (2013). A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental Modelling and Software*, 48:17–26, DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.05.014. [23](#), [85](#), [134](#)
- Hunter, J., Volschenk, C., and Zorer, R. (2016). Vineyard row orientation of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz/101-14 Mgt: Climatic profiles and vine physiological status. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229:104–119, DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.06.013. [41](#)
- IPCC (2015). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on

- Climate Change, Geneva, Switzerland. [8](#), [9](#), [31](#), [32](#), [40](#), [113](#)
- 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 University Press, [masson-delmotte, v., p. zhai, a. pirani, s. l. connors, c. péan, s. berger, n. caud, y. chen, l. goldfarb, m. i. gomis, m. huang, k. leitzell, e. lonnoy, j. b. r. matthews, t. k. maycock, t. waterfield, o. yelekçi, r. yu and b. zhou (eds.)] edition. [1](#)
- Jancovici, J. (2006). Évolution du climat futur et enjeux pour la société : comment débattre sur des bases saines ? In *L'homme face au climat: symposium annuel*. Odile Jacob. [11](#)
- Janssen, P. and Heuberger, P. (1995). Calibration of process-oriented models. *Ecological Modelling*, 83(1-2):55–66, DOI: 10.1016/0304-3800(95)00084-9. [93](#)
- Jones, G. V. (2015). *Grapevines in a Changing Environment: A Global Perspective*, pages 1–17. John Wiley and Sons. [17](#)
- Jones, G. V. and Webb, L. B. (2010). Climate Change, Viticulture, and Wine: Challenges and Opportunities. *Journal of Wine Research*, 21(2-3):103–106, DOI: 10.1080/09571264.2010.530091. [17](#), [18](#)
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., and Storchmann, K. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3):319–343, DOI: 10.1007/s10584-005-4704-2. [18](#), [31](#)
- Kapur, B., Steduto, P., and Todorovic, M. (2007). Prediction of Climatic Change for the Next 100 Years in the Apulia Region, Southern Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 2(4):365, DOI: 10.4081/ija.2007.365. [44](#)
- Knowling, M. J., Bennett, B., Ostendorf, B., Westra, S., Walker, R. R., Pellegrino, A., Edwards, E. J., Collins, C., Pagay, V., and Grigg, D. (2021). Bridging the gap between data and decisions: A review of process-based models for viticulture. *Agricultural Systems*, 193:103209, DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103209. [152](#), [153](#), [154](#)
- Lafond, D. and Métral, R. (2015). Concevoir en partenariat une EcoViticulture ECONomiquement viable et ECOlogiquement responsable par rapport aux pesticides (EcoViti). *Innovations Agronomiques*, 46:39–50, DOI: 10.15454/1.4622667630938416E12. [57](#)
- Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F., Moussa, R., and Voltz, M. (2010). GeoMHYDAS: A landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas. *Computers and Geosciences*, 36(8):1021–1032, DOI: 10.1016/j.cageo.2009.12.005. [73](#), [74](#), [90](#), [91](#)
- Lamanda, N., Roux, S., Delmotte, S., Merot, A., Rapidel, B., Adam, M., and Wery,

- J. (2012). A protocol for the conceptualisation of an agro-ecosystem to guide data acquisition and analysis and expert knowledge integration. *European Journal of Agronomy*, 38:104–116, DOI: 10.1016/j.eja.2011.07.004. [23](#)
- Lammoglia, A., Leturcq, S., and Delay, É. (2019). The VitiTerroir model to simulate the spatial dynamics of vineyards on the long term (1836-2014). *Cybergeo : European Journal of Geography*, DOI: 10.4000/cybergeo.33636. [157](#), [158](#)
- Lane, D. C. (2008). The emergence and use of diagramming in system dynamics: A critical account. *Systems Research and Behavioral Science*, 25(1):3–23, DOI: 10.1002/sres.826. [25](#), [159](#)
- Laurent, C., Oger, B., Taylor, J. A., Scholasch, T., Metay, A., and Tisseyre, B. (2021). A review of the issues, methods and perspectives for yield estimation, prediction and forecasting in viticulture. *European Journal of Agronomy*, 130:126339. [152](#)
- Le Gal, P. Y., Dugué, P., Faure, G., and Novak, S. (2011). How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? a review. *Agricultural Systems*, 104(9):714–728, DOI: 10.1016/j.agsy.2011.07.007. [24](#)
- Le Roux, R., de Rességuier, L., Corpetti, T., Jégou, N., Madelin, M., van Leeuwen, C., and Quénol, H. (2017). Comparison of two fine scale spatial models for mapping temperatures inside winegrowing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247:159–169, DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.07.020. [21](#), [107](#)
- Le Roux, R., Katurji, M., Zawar-Reza, P., Quénol, H., and Sturman, A. (2018). Comparison of statistical and dynamical downscaling results from the WRF model. *Environmental Modelling and Software*, 100:67–73, DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.11.002. [10](#), [156](#)
- Lebon, E., Dumas, V., Pieri, P., and Schultz, H. R. (2003). Modelling the seasonal dynamics of the soil water balance of vineyards. *Functional Plant Biology*, 30(6):699–710, DOI: 10.1071/FP02222. [93](#)
- Lebon, N. (2021). *Modéliser et Analyser l'effet Cumulé Agro-Hydrologique Des Retenues d'eau Dans Les Bassins Versants Agricoles*. These en préparation, Montpellier, SupAgro. [156](#)
- Leenhardt, D., Therond, O., Cordier, M.-O., Gascuel-Oudou, C., Reynaud, A., Durand, P., Bergez, J.-E., Clavel, L., Masson, V., and Moreau, P. (2012). A generic framework for scenario exercises using models applied to water-resource management. *Environmental Modelling and Software*, 37:125–133, DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.03.010. [2](#), [13](#), [24](#), [71](#), [88](#), [108](#), [134](#)
- Leolini, L., Bregaglio, S., Moriondo, M., Ramos, M., Bindi, M., and Ginaldi, F. (2018). A model library to simulate grapevine growth and development: Software

- implementation, sensitivity analysis and field level application. *European Journal of Agronomy*, 99:92–105, DOI: 10.1016/j.eja.2018.06.006. [20](#), [74](#), [107](#)
- Lereboullet, A.-L., Bardsley, D., and Beltrando, G. (2013a). Assessing vulnerability and framing adaptive options of two Mediterranean wine growing regions facing climate change: Roussillon (France) and McLaren Vale (Australia). *EchoGéo*, (23), DOI: 10.4000/echogeo.13384. [13](#), [20](#), [113](#), [114](#)
- Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., and Bardsley, D. K. (2013b). Socio-ecological adaptation to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164:273–285, DOI: 10.1016/j.agee.2012.10.008. [20](#), [31](#), [37](#), [40](#), [42](#), [48](#), [51](#), [54](#), [57](#)
- Lessio, F. and Alma, A. (2021). Models Applied to Grapevine Pests: A Review. *Insects*, 12(2):169, DOI: 10.3390/insects12020169. [155](#)
- Le Treut, H. (2010). *Nouveau Climat sur la Terre: COMPRENDRE, PRÉDIRE, RÉAGIR*. Flammarion. [11](#)
- Levin, A. D., Matthews, M. A., and Williams, L. E. (2020a). Effect of Preveraison Water Deficits on the Yield Components of 15 Winegrape Cultivars. *American Journal of Enology and Viticulture*, 71(3):208–221, DOI: 10.5344/ajev.2020.19073. [152](#)
- Levin, A. D., Williams, L. E., and Matthews, M. A. (2020b). A continuum of stomatal responses to water deficits among 17 wine grape cultivars (*Vitis vinifera*). *Functional Plant Biology*, 47(1):11–25, DOI: 10.1071/FP19073. [107](#)
- Lionello, P. and Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5):1481–1493, DOI: 10.1007/s10113-018-1290-1. [10](#)
- Lobell, D. B. (2014). Climate change adaptation in crop production: Beware of illusions. *Global Food Security*, 3(2):72–76, DOI: 10.1016/j.gfs.2014.05.002. [14](#)
- Lobell, D. B., Field, C. B., Cahill, K. N., and Bonfils, C. (2006). Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2-4):208–218, DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.10.006. [31](#)
- López-Urrea, R., Sánchez, J. M., Montoro, A., Mañas, F., and Intrigliolo, D. S. (2020). Effect of using pruning waste as an organic mulching on a drip-irrigated vineyard evapotranspiration under a semi-arid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291:108064, DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108064. [56](#)
- Loyce, C. and Wery, J. (2006). *Les Outils Des Agronomes Pour l'évaluation et La Conception de Systèmes de Culture*. Quae, Paris, l'agronomie aujourd'hui edition. [22](#)

- Ludwig, F. and Asseng, S. (2006). Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems*, 90(1):159–179, DOI: 10.1016/j.agsy.2005.12.002. [11](#)
- Magnan, A. (2009). Proposition d’une trame de recherche pour appréhender la capacité d’adaptation au changement climatique. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l’environnement*, (Volume 9 Numéro 3), DOI: 10.4000/vertigo.9189. [25](#)
- Malheiro, A., Santos, J., Fraga, H., and Pinto, J. (2010). Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe. *Climate Research*, 43(3):163–177, DOI: 10.3354/cr00918. [13](#), [19](#), [113](#), [134](#)
- Maraux, F., Malézieux, É., and Gary, C. (2013). From Artificialization to the Ecologization of Cropping Systems. In Hainzelin, É., editor, *Cultivating Biodiversity to Transform Agriculture*, pages 45–90. Springer Netherlands, Dordrecht, DOI: 10.1007/978-94-007-7984-6_3. [163](#)
- March, H., Therond, O., and Leenhardt, D. (2012). Water futures: Reviewing water-scenario analyses through an original interpretative framework. *Ecological Economics*, 82:126–137, DOI: 10.1016/j.ecolecon.2012.07.006. [115](#)
- Marín, D., Armengol, J., Carbonell-Bejerano, P., Escalona, J. M., Gramaje, D., Hernández-Montes, E., Intrigliolo, D. S., Martínez-Zapater, J. M., Medrano, H., Mirás-Avalos, J. M., Palomares-Rius, J. E., Romero-Azorín, P., Savé, R., Santesteban, L. G., and de Herralde, F. (2020). Challenges of viticulture adaptation to global change: Tackling the issue from the roots. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, n/a(n/a), DOI: 10.1111/ajgw.12463. [133](#)
- Marjou, M. and Garcia De Cortazar Atauri, I. (2019). Analyse climatique passée et future des terres viticoles sur le secteur Ventoux. Technical report, Inconnu, DOI: 10.15454/1.5586048305359907E12. [23](#)
- Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Paré, N., Voltz, M., and Biarnès, A. (2016). Modelling Management Practices in Viticulture while Considering Resource Limitations: The Dhivine Model. *PLOS ONE*, 11(3):e0151952, DOI: 10.1371/journal.pone.0151952. [57](#), [74](#), [155](#), [159](#)
- Meadow, A. M., Ferguson, D. B., Guido, Z., Horangic, A., Owen, G., and Wall, T. (2015). Moving toward the Deliberate Coproduction of Climate Science Knowledge. *Weather, Climate, and Society*, 7(2):179–191, DOI: 10.1175/WCAS-D-14-00050.1. [143](#)
- Medrano, H., Escalona, J. M., Cifre, J., Bota, J., and 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, DOI: 10.1071/FP02110. [52](#)

- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J.-M., Pou, A., Fuentes, S., Flexas, J., and Bota, J. (2015). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2):499–517, DOI: 10.1007/s13593-014-0280-z. [31](#), [40](#), [41](#), [43](#)
- Merot, A., Belhouchette, H., Saj, S., and Wery, J. (2020). Implementing organic farming in vineyards. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(2):164–187, DOI: 10.1080/21683565.2019.1631934. [133](#)
- Michelangeli, P.-A., Vrac, M., and Loukos, H. (2009). Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophysical Research Letters*, 36(11):L11708, DOI: 10.1029/2009GL038401. [78](#), [94](#)
- Milestad, R., Svenfelt, Å., and Dreborg, K. H. (2014). Developing integrated explorative and normative scenarios: The case of future land use in a climate-neutral Sweden. *Futures*, 60:59–71, DOI: 10.1016/j.futures.2014.04.015. [149](#)
- Minet, J., Curnel, Y., Gobin, A., Goffart, J.-P., Mélard, F., Tychon, B., Wellens, J., and Defourny, P. (2017). Crowdsourcing for agricultural applications: A review of uses and opportunities for a farmsourcing approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142:126–138, DOI: 10.1016/j.compag.2017.08.026. [25](#)
- Mirás-Avalos, J. M., Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., and Orriols-Fernández, I. (2016). Irrigation effects on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. ‘Albariño’ under the humid climate of Galicia. *OENO One*, 50(4):183–194, DOI: 10.20870/oeno-one.2016.50.4.63. [44](#)
- Mirás-Avalos, J. M., Uriarte, D., Lakso, A. N., and Intrigliolo, D. S. (2018). Modeling grapevine performance with ‘VitiSim’, a weather-based carbon balance model: Water status and climate change scenarios. *Scientia Horticulturae*, 240:561–571, DOI: 10.1016/j.scienta.2018.06.065. [56](#)
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A., and PRISMA-P Group (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4(1):1, DOI: 10.1186/2046-4053-4-1. [34](#)
- Molitor, D., Schultz, M., Mannes, R., Pallez-Barthel, M., Hoffmann, L., and Beyer, M. (2019). Semi-Minimal Pruned Hedge: A Potential Climate Change Adaptation Strategy in Viticulture. *Agronomy*, 9(4):173, DOI: 10.3390/agronomy9040173. [41](#)
- Morales-Castilla, I., García de Cortázar-Atauri, I., Cook, B. I., Lacombe, T., Parker, A., van Leeuwen, C., Nicholas, K. A., and Wolkovich, E. M. (2020). Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, page 201906731, DOI: 10.1073/pnas.1906731117. [56](#), [73](#), [74](#), [90](#), [91](#), [118](#),

- Moriondo, M., Bindi, M., Brilli, L., Costafreda-Aumedes, S., Dibari, C., Leolini, L., Padovan, G., Trombi, G., Karali, A., Varotsos, K. V., Lemesios, G., Giannakopoulos, C., Papadaskalopoulou, C., and Merante, P. (2021). Assessing climate change impacts on crops by adopting a set of crop performance indicators. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(2):45, DOI: 10.1007/s41207-021-00246-7. [21](#)
- Moriondo, M., Bindi, M., Fagarazzi, C., Ferrise, R., and Trombi, G. (2011). Framework for high-resolution climate change impact assessment on grapevines at a regional scale. *Regional Environmental Change*, 11(3):553–567, DOI: 10.1007/s10113-010-0171-z. [107](#)
- Moriondo, M., Ferrise, R., Trombi, G., Brilli, L., Dibari, C., and Bindi, M. (2015). Modelling olive trees and grapevines in a changing climate. *Environmental Modelling and Software*, 72:387–401, DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.12.016. [19](#), [31](#), [53](#), [56](#), [57](#), [70](#), [85](#), [90](#), [91](#), [152](#)
- Moriondo, M., Jones, G. V., Bois, B., Dibari, C., Ferrise, R., Trombi, G., and Bindi, M. (2013). Projected shifts of wine regions in response to climate change. *Climatic Change*, 119(3-4):825–839, DOI: 10.1007/s10584-013-0739-y. [19](#), [39](#)
- Mosedale, J. R., Abernethy, K. E., Smart, R. E., Wilson, R. J., and Maclean, I. M. D. (2016). Climate change impacts and adaptive strategies: Lessons from the grapevine. *Global Change Biology*, 22(11):3814–3828, DOI: 10.1111/gcb.13406. [17](#), [18](#), [21](#), [22](#), [31](#), [39](#), [84](#), [114](#)
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., and Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282):747–756, DOI: 10.1038/nature08823. [9](#)
- Moussa, R., Voltz, M., and Andrieux, P. (2002). Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16(2):393–412, DOI: 10.1002/hyp.333. [74](#), [90](#), [91](#)
- Moutinho-Pereira, J., Gonçalves, B., Bacelar, E., Cunha, J. B., Coutinho, J., and Correia, C. M. (2009). Effects of elevated CO₂ on grapevine (*Vitis vinifera* L.): Physiological and yield attributes. *Journal of Grapevine Research*, 48(4):159–165, DOI: 10.5073/vitis.2009.48.159-165. [19](#), [31](#), [106](#)
- Moutinho-Pereira, J. M., Bacelar, E. A., Gonçalves, B., Ferreira, H. F., Coutinho, J. F.,

- and Correia, C. M. (2010). Effects of Open-Top Chambers on physiological and yield attributes of field grown grapevines. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32(2):395–403, DOI: 10.1007/s11738-009-0417-x. [19](#), [31](#)
- Murgue, C., Therond, O., and Leenhardt, D. (2015). Toward integrated water and agricultural land management: Participatory design of agricultural landscapes. *Land Use Policy*, 45:52–63, DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.01.011. [2](#)
- Murgue, C., Therond, O., and Leenhardt, D. (2016). Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Land Use Policy*, 54:339–354, DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.02.020. [2](#), [22](#), [85](#), [108](#)
- Nalau, J. and Verrall, B. (2021). Mapping the evolution and current trends in climate change adaptation science. *Climate Risk Management*, 32:100290, DOI: 10.1016/j.crm.2021.100290. [14](#)
- Nations-Unis (2021). Urgence climatique : Le Secrétaire général appelle les principaux émetteurs à établir des objectifs plus ambitieux de réduction des émissions avant la COP26. [1](#)
- Nauveau, A., Gary, C., Prévot, L., and Hossard, L. (2021). Evaluating Strategies for Adaptation to Climate Change in Grapevine Production—A Systematic Review. *Frontiers in Plant Science*, 11:21–54, DOI: 10.3389/fpls.2020.607859. [84](#), [108](#), [113](#), [114](#)
- Neethling, E. (2016). *Adaptation de la viticulture au changement climatique: vers des stratégies à haute résolution*. PhD thesis. [21](#)
- Neethling, E., Barbeau, G., Bonnefoy, C., and Quénel, H. (2012). Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley. *Climate Research*, 53:89–101. [102](#)
- Neethling, E., Barbeau, G., Coulon-Leroy, C., and Quénel, H. (2019). Spatial complexity and temporal dynamics in viticulture: A review of climate-driven scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276–277:107618, DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107618. [17](#), [36](#), [113](#)
- Neethling, E., Petitjean, T., Quénel, H., and 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(5):777–803, DOI: 10.1007/s11027-015-9698-0. [20](#), [42](#), [47](#), [48](#), [51](#), [54](#), [113](#), [114](#), [133](#)
- Nelder, J. A. and Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4):308–313. [98](#)
- Nendel, C. and Kersebaum, K. C. (2004). A simple model approach to simulate

- nitrogen dynamics in vineyard soils. *Ecological Modelling*, 177(1):1–15, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2004.01.014. [56](#)
- Nicholas, K. A. and 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, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.01.001. [21](#), [31](#), [42](#), [48](#), [51](#), [57](#), [113](#), [114](#), [133](#)
- Nougier, M., Graveline, N., and Touzard, J.-M. (2020). Climathon de Montpeyroux : Comment pérenniser les vignobles et les vigneronns de Montpeyroux face aux évolutions climatiques et sociétales, compte-rendu des 6 and 7 mars 2020. Technical report, Inrae ; Montpellier Supagro ; Montpellier Université d’Excellence (MUSE) ; Syndicat d’Appellation Languedoc. [20](#), [148](#)
- Novak, J. D. and Cañas, A. J. (2008). The Theory Underlying Concept Maps and How to Construct and Use Them. *Technical Report IHMC CmapTools*, page 36. [25](#)
- Ojeda, H. (2007). Irrigation qualitative de précision de la vigne. *Progrès Agricole et Viticole*, 124:133–141. [90](#), [118](#)
- Olen, B., Wu, J., and Langpap, C. (2016). Irrigation Decisions for Major West Coast Crops: Water Scarcity and Climatic Determinants. *American Journal of Agricultural Economics*, 98(1):254–275, DOI: 10.1093/ajae/aav036. [48](#), [53](#), [56](#)
- Ollat, N. and Touzard, J.-M. (2014). Adaptation à long terme au changement climatique pour la viticulture et l’oenologie : Un programme de recherche sur les vignobles français. *Revue des oenologues et des techniques vitivinicoles et oenologiques*, 41(152):11–12. [20](#)
- Ollat, N., Touzard, J.-M., and van Leeuwen, C. (2016). Climate Change Impacts and Adaptations: New Challenges for the Wine Industry. *Journal of Wine Economics*, 11(01):139–149, DOI: 10.1017/jwe.2016.3. [2](#), [18](#)
- Paas, W., San Martín, C., Soriano, B., van Ittersum, M. K., Meuwissen, M. P., and Reidsma, P. (2021). Assessing future sustainability and resilience of farming systems with a participatory method: A case study on extensive sheep farming in Huesca, Spain. *Ecological Indicators*, 132:108236, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108236. [149](#)
- Palliotti, A., Panara, F., Famiani, F., Sabbatini, P., Howell, G. S., Silvestroni, O., and Poni, S. (2013). Postveraison Application of Antitranspirant Di-1- p -Menthene to Control Sugar Accumulation in Sangiovese Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 64(3):378–385, DOI: 10.5344/ajev.2013.13015. [46](#)
- Palliotti, A., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Gatti, M., and Poni, S. (2014). Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review. *Scientia Horticulturae*, 178:43–54, DOI:

- 10.1016/j.scienta.2014.07.039. [31](#), [41](#), [42](#), [46](#)
- Passioura, J. B. (1996). Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? *Agronomy Journal*, 88(5):690, DOI: 10.2134/agronj1996.00021962008800050002x. [24](#)
- Payan, J.-C. (2017). Peut-on réduire la sensibilité au changement climatique sans irriguer ? *Entretiens Viti-Vinicoles Languedoc Roussillon*, pages 19–23. [20](#)
- Pellegrino, A., Goze, E., Lebon, E., and 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, DOI: 10.1016/j.eja.2006.03.003. [93](#)
- Périnelle, A., Meynard, J.-M., and Scopel, E. (2021). Combining on-farm innovation tracking and participatory prototyping trials to develop legume-based cropping systems in West Africa. *Agricultural Systems*, 187:102978, DOI: 10.1016/j.agsy.2020.102978. [22](#)
- Petrie, P. R., Brooke, S. J., Moran, M. A., and Sadras, V. O. (2017). Pruning after budburst to delay and spread grape maturity. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 23(3):378–389, DOI: 10.1111/ajgw.12303. [46](#)
- Phogat, V., Cox, J. W., Mallants, D., Petrie, P. R., Oliver, D. P., and Pitt, T. R. (2020). Historical and future trends in evapotranspiration components and irrigation requirement of winegrapes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, n/a(n/a), DOI: 10.1111/ajgw.12446. [56](#)
- Phogat, V., Cox, J. W., and Šimůnek, J. (2018). Identifying the future water and salinity risks to irrigated viticulture in the Murray-Darling Basin, South Australia. *Agricultural Water Management*, 201:107–117, DOI: 10.1016/j.agwat.2018.01.025. [44](#), [50](#), [53](#)
- Pichon, L., Brunel, G., Payan, J. C., Taylor, J., Bellon-Maurel, V., and 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*, 22:608–626, DOI: 10.1007/s11119-021-09797-9. [107](#)
- Pieri, P., Lebon, E., and Brisson, N. (2012). Climate change impact on French vineyards as predicted by models. *Acta Horticulturae*, (931):29–37, DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.931.2. [41](#), [53](#), [85](#)
- Planton, S., Lionello, P., Artale, V., Aznar, R., Carrillo, A., Colin, J., Congedi, L., Dubois, C., Elizalde, A., Gualdi, S., Hertig, E., Jacobeit, J., Jordà, G., Li, L., Mariotti, A., Piani, C., Ruti, P., Sanchez-Gomez, E., Sannino, G., Sevault, F., Somot, S., and Tsimplis, M. (2012). The Climate of the Mediterranean Region in Future Climate Projections. In *The Climate of the Mediterranean Region*, pages 449–502. Elsevier, DOI: 10.1016/B978-0-12-416042-2.00008-2. [10](#)

- PNACC (2011). Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique (2011-2015). Technical report. [15](#)
- Poni, S., Gatti, M., Palliotti, A., Dai, Z., Duchêne, E., Truong, T.-T., Ferrara, G., Matarrese, A. M. S., Gallotta, A., Bellincontro, A., Mencarelli, F., and Tombesi, S. (2018). Grapevine quality: A multiple choice issue. *Scientia Horticulturae*, 234:445–462, DOI: [10.1016/j.scienta.2017.12.035](#). [46](#)
- Quénol, H., Garcia de Cortazar Atauri, I., Bois, B., Sturman, A., Bonnardot, V., and Le Roux, R. (2017). Which climatic modeling to assess climate change impacts on vineyards? *OENO One*, 51(2):91–97, DOI: [10.20870/oeno-one.2016.0.0.1869](#). [9](#), [51](#), [107](#)
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10):2417–2431, DOI: [10.1016/j.biocon.2008.07.014](#). [22](#)
- Reich, P. B. and Hobbie, S. E. (2013). Decade-long soil nitrogen constraint on the CO₂ fertilization of plant biomass. *Nature Climate Change*, 3(3):278–282, DOI: [10.1038/nclimate1694](#). [107](#)
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A. O., and Leemans, R. (2010). Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: The importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy*, 32(1):91–102, DOI: [10.1016/j.eja.2009.06.003](#). [155](#)
- Resco, P., Iglesias, A., Bardají, I., and Sotés, V. (2016). Exploring adaptation choices for grapevine regions in Spain. *Regional Environmental Change*, 16(4):979–993, DOI: [10.1007/s10113-015-0811-4](#). [20](#), [53](#)
- Réseau Action Climat (2014). Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques – Recueil d'expériences territoriales. Technical report. [12](#), [16](#)
- Rezaei, E. E., Siebert, S., and Ewert, F. (2015). Intensity of heat stress in winter wheat—phenology compensates for the adverse effect of global warming. *Environmental Research Letters*, 10(2):024012, DOI: [10.1088/1748-9326/10/2/024012](#). [11](#)
- Ribes, A., Thao, S., Vautard, R., Dubuisson, B., Somot, S., Colin, J., Planton, S., and Soubeyroux, J.-M. (2018). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*, DOI: [10.1007/s00382-018-4179-2](#). [10](#)
- Riou, C., Valancogne, C., and Pieri, P. (1989). Un modèle simple d'interception du rayonnement solaire par la vigne - vérification expérimentale. *Agronomie*, 9(5):441–450, DOI: [10.1051/agro:19890502](#). [93](#), [118](#)
- Ripoche, A., Relier, J.-P., Martin-Clouaire, R., Paré, N., Biarnès, A., and Gary, C. (2011). Modelling adaptive management of intercropping in vineyards to satisfy agronomic and

- environmental performances under Mediterranean climate. *Environmental Modelling and Software*, 26(12):1467–1480, DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.08.003. [57](#)
- Ritchie, J., Lewis, J., and Elam, G. (2003). Designing and selecting samples. In *Qualitative Research Practice: A Guide for Social Science Students and Researchers*, volume 41. SAGE Publications, Inc., London, ritchie j. and lewis j. (eds) edition. [117](#)
- Roby, J.-P., Marguerit, E., and van Leeuwen, C. (2008). *Références vigne: références technico-économiques de systèmes de conduite de la vigne*. Références. Synthèse agricole, Bordeaux, 2e éd edition. [120](#)
- Rodriguez, D., Cox, H., deVoil, P., and Power, B. (2014). A participatory whole farm modelling approach to understand impacts and increase preparedness to climate change in Australia. *Agricultural Systems*, 126:50–61, DOI: 10.1016/j.agry.2013.04.003. [85](#), [157](#)
- Romero, P., Botía, P., and Navarro, J. M. (2018). Selecting rootstocks to improve vine performance and vineyard sustainability in deficit irrigated Monastrell grapevines under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 209:73–93, DOI: 10.1016/j.agwat.2018.07.012. [31](#), [48](#), [55](#)
- Romero, P., Castro, G., Gómez, J., and Fereres, E. (2007). Curve Number Values for Olive Orchards under Different Soil Management. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6):1758, DOI: 10.2136/sssaj2007.0034. [90](#)
- Rouault, A., Perrin, A., Renaud-Gentié, C., Julien, S., and Jourjon, F. (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, DOI: 10.1007/s11367-019-01684-w. [159](#)
- Sacchelli, S., Fabbri, S., Bertocci, M., Marone, E., Menghini, S., and Bernetti, I. (2017). A mix-method model for adaptation to climate change in the agricultural sector: A case study for Italian wine farms. *Journal of Cleaner Production*, 166:891–900, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.095. [51](#), [109](#)
- Sacchelli, S., Fabbri, S., and Menghini, S. (2016). Climate Change, Wine and Sustainability: A Quantitative Discourse Analysis of the International Scientific Literature. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8:167–175, DOI: 10.1016/j.aaspro.2016.02.090. [43](#)
- Sadras, V. O. and 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, DOI: 10.1016/j.eja.2009.09.004. [19](#)
- Salazar-Parra, C., Aranjuelo, I., Pascual, I., Erice, G., Sanz-Sáez, Á., Aguirreolea, J.,

- Sánchez-Díaz, M., Irigoyen, J. J., Araus, J. L., and Morales, F. (2015). Carbon balance, partitioning and photosynthetic acclimation in fruit-bearing grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo) grown under simulated climate change (elevated CO₂, elevated temperature and moderate drought) scenarios in temperature gradient greenhouses. *Journal of Plant Physiology*, 174:97–109, DOI: 10.1016/j.jplph.2014.10.009. [19](#)
- Santillán, D., Sotés, V., Iglesias, A., and Garrote, L. (2019). Adapting viticulture to climate change in the Mediterranean region: Evaluations accounting for spatial differences in the producers-climate interactions. *BIO Web of Conferences*, 12:01001, DOI: 10.1051/bioconf/20191201001. [85](#), [161](#)
- Santos, J. A., Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., Costafreda-Aumedes, S., Kartschall, T., Menz, C., Molitor, D., Junk, J., Beyer, M., and Schultz, H. R. (2020). A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Applied Sciences*, 10(9):3092, DOI: 10.3390/app10093092. [18](#), [32](#), [113](#)
- Sautier, M., Piquet, M., Duru, M., and 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, DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.02.050. [22](#), [160](#)
- Savi, T., Petruzzellis, F., Martellos, S., Stenni, B., Dal Borgo, A., Zini, L., Lisjak, K., and Nardini, A. (2018). Vineyard water relations in a karstic area: Deep roots and irrigation management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 263:53–59, DOI: 10.1016/j.agee.2018.05.009. [44](#)
- Schaap, B. F., Reidsma, P., Verhagen, J., Wolf, J., and 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, DOI: 10.1016/j.eja.2013.02.004. [25](#), [135](#), [160](#)
- Scholasch, T. and Rienth, M. (2019). Review of water deficit mediated changes in vine and berry physiology; Consequences for the optimization of irrigation strategies. *OENO One*, 53(3):423–444, DOI: 10.20870/oeno-one.2019.53.3.2407. [45](#)
- Schultz, H. R. (2010). Climate Change and Viticulture: Research Needs for Facing the Future. *Journal of Wine Research*, 21(2-3):113–116, DOI: 10.1080/09571264.2010.530093. [31](#)
- Serra, I., Strever, A., Myburgh, P. A., and Deloire, A. (2014). Review: The interaction between rootstocks and cultivars (*Vitis vinifera* L.) to enhance drought tolerance in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 20(1):1–14, DOI: 10.1111/ajgw.12054. [40](#)

- Sinclair, F., Wezel, A., Mbow, C., Chomba, S., Robiglio, V., and Harrison, R. (2019). The contribution of agroecological approaches to realizing climate-resilient agriculture. page 46. [163](#)
- Smart, R. E. and Coombe, B. G. (1983). Water relations of grapevines. In Kozłowski, T., editor, *Water Deficits and Plant Growth*, volume VII, pages 137–196. London, academic press edition. [17](#)
- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., Qin, D., et al. (2007). *Climate Change 2007- the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, volume 4. Cambridge university press. [8](#)
- Stocker, T. (2014). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press. [8](#)
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., and Nelson, R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3):289–307, DOI: 10.1016/S1161-0301(02)00109-0. [73](#), [74](#)
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4):485–498, DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1. [9](#)
- Team, R. C. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. [33](#), [95](#)
- Thiollet-Scholtus, M. and Bockstaller, C. (2015). Using indicators to assess the environmental impacts of wine growing activity: The INDIGO® method. *European Journal of Agronomy*, 62:13–25, DOI: 10.1016/j.eja.2014.09.001. [57](#)
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., and Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: A review. *Global Change Biology*, 20(11):3313–3328, DOI: 10.1111/gcb.12581. [162](#)
- Tissot, C., Neethling, E., Rouan, M., Barbeau, G., Quenol, H., and Le Coq, C. (2017). Modeling Environmental Impacts on Viticultural Ecosystems: A First Case Study in a Regulated Wine Producing Area. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 8(3):1–20, DOI: 10.4018/IJAEIS.2017070101. [25](#), [51](#), [54](#), [57](#), [74](#), [85](#), [86](#), [107](#), [159](#)
- Tomás, M., Medrano, H., Escalona, J. M., Martorell, S., Pou, A., Ribas-Carbó, M., and Flexas, J. (2014). Variability of water use efficiency in grapevines. *Environmental and Experimental Botany*, 103:148–157, DOI: 10.1016/j.envexpbot.2013.09.003. [40](#)
- Tomaz, A., Pacheco, C., and Coletto Martinez, J. (2017). Influence of cover cropping on water uptake dynamics in an irrigated Mediterranean vineyard: Cover Cropping

- and Water Uptake Dynamics. *Irrigation and Drainage*, 66(3):387–395, DOI: 10.1002/ird.2115. [43](#), [55](#)
- Tonietto, J. and Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1-2):81–97, DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.06.001. [1](#), [17](#), [102](#)
- Toreti, A., Deryng, D., Tubiello, F. N., Müller, C., Kimball, B. A., Moser, G., Boote, K., Asseng, S., Pugh, T. A. M., Vanuytrecht, E., Pleijel, H., Webber, H., Durand, J.-L., Dentener, F., Ceglar, A., Wang, X., Badeck, F., Lecerf, R., Wall, G. W., van den Berg, M., Hoegy, P., Lopez-Lozano, R., Zampieri, M., Galmarini, S., O’Leary, G. J., Manderscheid, R., Mencos Contreras, E., and Rosenzweig, C. (2020). Narrowing uncertainties in the effects of elevated CO₂ on crops. *Nature Food*, 1(12):775–782, DOI: 10.1038/s43016-020-00195-4. [106](#)
- Torres, N., Goicoechea, N., and Carmen Antolín, M. (2018). Influence of irrigation strategy and mycorrhizal inoculation on fruit quality in different clones of Tempranillo grown under elevated temperatures. *Agricultural Water Management*, 202:285–298, DOI: 10.1016/j.agwat.2017.12.004. [55](#)
- Torres, N., Hilbert, G., Luquin, J., Goicoechea, N., and Antolín, M. C. (2017). Flavonoid and amino acid profiling on *Vitis vinifera* L. cv Tempranillo subjected to deficit irrigation under elevated temperatures. *Journal of Food Composition and Analysis*, 62:51–62, DOI: 10.1016/j.jfca.2017.05.001. [50](#), [52](#)
- Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., Orriols-Fernández, I., and Mirás-Avalos, J. M. (2015). Effects of deficit irrigation on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. ‘Godello’ and ‘Treixadura’ in Ribeiro, NW Spain. *Agricultural Water Management*, 161:20–30, DOI: 10.1016/j.agwat.2015.07.011. [19](#), [44](#), [48](#)
- Uliarte, E. M., Schultz, H. R., Frings, C., Pfister, M., Parera, C. A., and del Monte, R. F. (2013). Seasonal dynamics of CO₂ balance and water consumption of C₃ and C₄-type cover crops compared to bare soil in a suitability study for their use in vineyards in Germany and Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology*, 181:1–16, DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.06.019. [37](#)
- USDA (1993). National Engineering Handbook, title 210–VI. Part 630, chapters 9. Washington, DC. [90](#)
- Valentini, G., Allegro, G., Pastore, C., Colucci, E., and Filippetti, I. (2019). Post-veraison trimming slow down sugar accumulation without modifying phenolic ripening in Sangiovese vines: Post-veraison trimming of Sangiovese vines. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3):1358–1365, DOI: 10.1002/jsfa.9311. [46](#)
- Van Asselt Marjolein, B. A. and Rijkens-Klomp, N. (2002). A look in

- the mirror: Reflection on participation in Integrated Assessment from a methodological perspective. *Global Environmental Change*, 12(3):167–184, DOI: 10.1016/S0959-3780(02)00012-2. [x](#), [146](#), [147](#)
- van Berkel, D. B. and Verburg, P. H. (2014). Spatial quantification and valuation of cultural ecosystem services in an agricultural landscape. *Ecological Indicators*, 37:163–174, DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.06.025. [23](#)
- Van den Belt, M. (2004). *Mediated Modeling: A System Dynamics Approach To Environmental Consensus Building*. Island Press. [23](#), [24](#), [146](#), [152](#)
- van Leeuwen, C. and Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics*, 11(01):150–167, DOI: 10.1017/jwe.2015.21. [31](#), [84](#)
- van Leeuwen, C. and Destrac-Irvine, A. (2017). Modified grape composition under climate change conditions requires adaptations in the vineyard. *OENO One*, 51(2):147–154, DOI: 10.20870/oenone.2017.51.2.1647. [18](#), [41](#)
- Van Leeuwen, C., Pieri, P., Gowdy, M., Ollat, N., and 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, DOI: 10.20870/oenone.2019.53.2.2420. [41](#), [53](#), [73](#), [74](#), [86](#), [120](#), [132](#), [158](#)
- van Leeuwen, C., Schultz, H. R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchene, E., Ollat, N., Pieri, P., Bois, B., Goutouly, J.-P., Quenol, H., Touzard, J.-M., Malheiro, A. C., Bavaresco, L., and 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, DOI: 10.1073/pnas.1307927110. [39](#), [85](#), [113](#)
- van Vliet, M., Kok, K., and Veldkamp, T. (2010). Linking stakeholders and modellers in scenario studies: The use of Fuzzy Cognitive Maps as a communication and learning tool. *Futures*, 42(1):1–14, DOI: 10.1016/j.futures.2009.08.005. [25](#)
- Van Wijk, M., Rufino, M., Enahoro, C., Parsons, D., Silvestri, S., Valdivia, R., and Herrero, M. (2012). A review on farm household modelling with a focus on climate change adaptation and mitigation. Technical report. [155](#)
- Vaz, M., Coelho, R., Rato, A., Samara-Lima, R., Silva, L. L., Campostrini, E., and Mota, J. B. (2016). Adaptive strategies of two Mediterranean grapevines varieties (Aragonez syn. Tempranillo and Trincadeira) face drought: Physiological and structural responses. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 28(2):205–220, DOI: 10.1007/s40626-016-0074-6. [19](#), [40](#), [52](#)
- Viguie, V., Lecocq, F., and Touzard, J.-M. (2014). Viticulture and Adaptation to Climate

- Change. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, pages 55–60. [31](#)
- Vinatier, F. and Arnaiz, A. G. (2018). Using high-resolution multitemporal imagery to highlight severe land management changes in Mediterranean vineyards. *Applied Geography*, 90:115–122, DOI: 10.1016/j.apgeog.2017.12.003. [119](#)
- Voinov, A. (2008). *Systems Science and Modeling for Ecological Economics*. Elsevier, Academic Press, London, 1. ed edition. [26](#), [70](#), [85](#), [88](#)
- Voinov, A. and Bousquet, F. (2010). Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling and Software*, 25(11):1268–1281, DOI: 10.1016/j.envsoft.2010.03.007. [22](#), [23](#), [86](#), [142](#)
- Voinov, A., Jenni, K., Gray, S., Kolagani, N., Glynn, P. D., Bommel, P., Prell, C., Zellner, M., Paolisso, M., Jordan, R., Sterling, E., Schmitt Olabisi, L., Giabbanelli, P. J., Sun, Z., Le Page, C., Elsworth, S., BenDor, T. K., Hubacek, K., Laursen, B. K., Jetter, A., Basco-Carrera, L., Singer, A., Young, L., Brunacini, J., and Smajgl, A. (2018). Tools and methods in participatory modeling: Selecting the right tool for the job. *Environmental Modelling and Software*, 109:232–255, DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.08.028. [25](#), [26](#), [71](#), [85](#), [109](#), [114](#)
- Webb, L. (2009). Extreme heat: Managing grapevine response based on vineyard observations from the 2009 heatwave across south-eastern Australia. [17](#)
- Webb, L. B., Whetton, P. H., and Barlow, E. W. R. (2007). Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13(3):165–175, DOI: 10.1111/j.1755-0238.2007.tb00247.x. [85](#)
- Wenter, A., Zanutelli, D., Montagnani, L., Tagliavini, M., and 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, DOI: 10.1016/j.scienta.2018.03.037. [44](#)
- Wickham, H. (2016). *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. [33](#), [95](#)
- Wilby, R. L. and Dessai, S. (2010). Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7):180–185, DOI: 10.1002/wea.543. [22](#)
- Wohlfahrt, Y., Collins, C., and Stoll, M. (2019). Grapevine bud fertility under conditions of elevated carbon dioxide. *OENO One*, 53(2), DOI: 10.20870/oeno-one.2019.53.2.2428. [107](#)
- Wohlfahrt, Y., Smith, J. P., Tittmann, S., Honermeier, B., and Stoll, M. (2018). Primary productivity and physiological responses of *Vitis vinifera* L. cvs. under Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE). *European Journal of Agronomy*, 101:149–162, DOI: 10.1016/j.eja.2018.09.005. [19](#), [50](#)

- Wolkovich, E. M., Burge, D. O., Walker, M. A., and Nicholas, K. A. (2017). Phenological diversity provides opportunities for climate change adaptation in winegrapes. *Journal of Ecology*, 105(4):905–912, DOI: 10.1111/1365-2745.12786. [40](#)
- Zhang, Q., Wang, S., Li, L., Inoue, M., Xiang, J., Qiu, G., and Jin, W. (2014). Effects of mulching and sub-surface irrigation on vine growth, berry sugar content and water use of grapevines. *Agricultural Water Management*, 143:1–8, DOI: 10.1016/j.agwat.2014.05.015. [40](#)
- Zhu, J., Fraysse, R., Trought, M. C. T., Raw, V., Yang, L., Greven, M., Martin, D., and Agnew, R. (2020). Quantifying the seasonal variations in grapevine yield components based on pre- and post-flowering weather conditions. *OENO One*, 54(2), DOI: 10.20870/oeno-one.2020.54.2.2926. [152](#)
- Zhu, X., Moriondo, M., van Ierland, E. C., Trombi, G., and Bindi, M. (2016). A model-based assessment of adaptation options for Chianti wine production in Tuscany (Italy) under climate change. *Regional Environmental Change*, 16(1):85–96, DOI: 10.1007/s10113-014-0622-z. [40](#), [53](#), [56](#)
- Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Klangidou, M., Proestos, Y., and Lelieveld, J. (2019). A multi-model, multi-scenario, and multi-domain analysis of regional climate projections for the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, DOI: 10.1007/s10113-019-01565-w. [10](#)
- Zufferey, V., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., Koestel, C., Gindro, K., Spangenberg, J. E., Viret, O., and Spring, J.-L. (2018). The impact of plant water status on the gas exchange, berry composition and wine quality of Chasselas grapes in Switzerland: Impacts of water stress on grapevine physiology. *OENO One*, 52(4), DOI: 10.20870/oeno-one.2018.52.4.2181. [152](#)
- Șerdinescu, A., Pîrcălabu, L., and Fotescu, L. (2014). Influence of soil maintenance systems and fruit load on grapes quality under drought conditions. *Scientific Papers - Series B, Horticulture*, LVIII(No.58):201–204. [46](#), [52](#)

Annexes

Annexe A

Présentation du projet LACCAVE

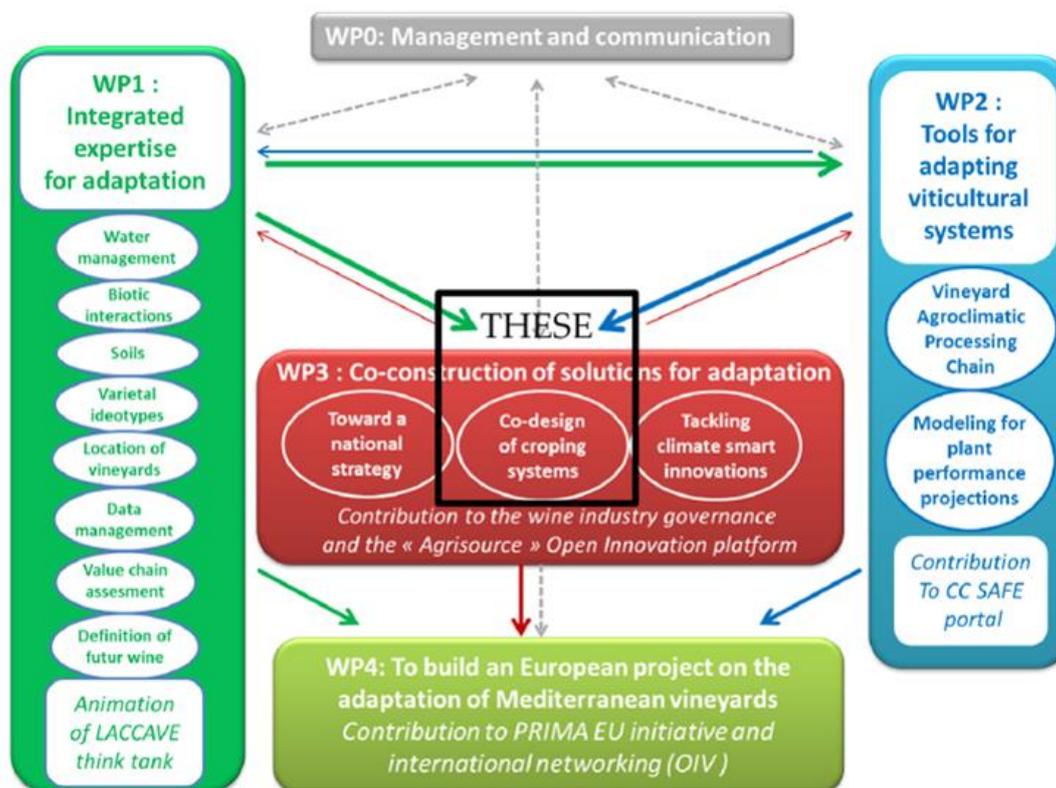


Figure 1 - Organisation du projet LACCAVE 2.21

Annexe B

Matériel supplémentaire de l'article
présenté en Chapitre 2

Supplementary Material

1 Supplementary Tables

Supplementary Table 1. Complete list of articles dataset (n=111) with description of the studied area, the adaptation (LT1: Site Selection, LT2: Plant Material, LT3: Vineyard design, LT4: Farm strategy, ST1: Irrigation, ST2: Soil management, ST3: Canopy management, ST4: Harvest and post-harvest management), scale and method.

N°	Reference	Studied area	Adaptation	Scale	Method	N°	Reference	Studied area	Adaptation	Scale	Method
1	(Alonso and Liu, 2013)	Spain	LT1, LT4, ST1, ST4	Farm	Expert judgement	56	(Lereboullet et al., 2013)	France, Australia	LT3, ST3, ST2, ST1, LT2, LT4	Region	Expert judgement
2	(dos Santos et al., 2007)	Portugal	ST1	Field	Experimental	57	(Levy and Lubell, 2018)	USA	LT1	Region	Expert judgement
3	(Ramos and Martínez-Casasnovas, 2010)	Spain	LT3	Field	Experimental	58	(Caravia et al., 2016)	Australia	LT3	Field	Experimental
4	(Grantham et al., 2010)	USA	ST1	Region	Modeling	59	(Caravia et al., 2017)	Australia	ST1	Field	Experimental
5	(Bardsley et al., 2018)	Australia	LT2, LT4, ST1, ST2, ST3	Region / Farm	Expert judgement	60	(Carvalho et al., 2017)	Portugal	LT2	Plant	Experimental
6	(Kapur et al., 2007)	Italy	ST1	Field / Region	Modeling	61	(Mirás-Avalos et al., 2016)	Spain	ST1	Field	Experimental
7	(Battaglini et al., 2009)	Italy	ST1, LT2	Field / Farm	Expert judgement	62	(Cirigliano et al., 2017)	Italy		Field	Experimental
8	(Belliveau et al., 2006)	Canada	ST1, LT4, ST3, LT2	Farm	Expert judgement	63	(Medrano et al., 2015)	Spain		Plant	Review
9	(Diffenbaugh et al., 2011)	USA	LT1, LT2	Region	Modeling	64	(Georgopoulou et al., 2017)	Greece		Farm/Region	Modeling
10	(Carvalho et al., 2018)	Portugal	ST1, LT2	Field	Experimental	65	(Santesteban et al., 2017)	Spain	ST1, ST2	Field	Experimental
11	(Bernardo et al., 2018)	Portugal	LT3, ST3, ST2, ST1, LT1, LT2	Field	Review	66	(Martínez-Lüscher et al., 2017)	Spain	LT3	Field	Experimental
12	(Duchene et al., 2012)	France	LT2	Plant	Experimental	67	(Mirás-Avalos et al., 2018)	Spain	ST1	Plant / Field	Modeling
13	(Nicholas and Durham, 2012)	USA	LT1, LT2, ST3, LT3, ST1	Farm	Expert judgement	68	(Neethling et al., 2017)	France	ST3, ST2, ST1, LT2	Field / Farm	Expert judgement

14	(Pieri et al., 2012)	France	LT2, LT3, LT1, ST1	Field	Modeling	69	(Mosedale et al., 2016)	UK	LT1, LT2, LT3, LT4, ST1, ST2, ST3	Plant/Region	Review
15	(Hannah et al., 2013)	USA	LT1	Plant / Region	Modeling	70	(Paciello et al., 2017)	Italy	ST1	Field	Experimental
16	(Milla-Tapia et al., 2013)	Chile	LT2	Plant	Experimental	71	(Pagliarani et al., 2017)	Italy	LT2	Plant	Experimental
17	(Palliotti et al., 2013)	Italy	ST3	Field	Experimental	72	(Petrie et al., 2017)	Australia	ST3	Field	Experimental
18	(Raymond and Spoehr, 2013)	Australia	ST2, ST1, LT2	Farm	Expert judgement	73	(Ronco et al., 2017)	Italy	ST1	Region	Expert judgement
19	(Stoll et al., 2013)	Germany	ST3	Field	Experimental	74	(Sacchelli et al., 2016)	Italy	ST1, LT3, LT2, LT4	Farm	Expert judgement
20	(Attia et al., 2014)	France	ST3	Plant	Experimental	75	(Tissot et al., 2017)	France	-	Plant/Field/Region	Expert judgement
21	(Clingeffer, 2010)	Australia	LT3, ST1, LT2, ST3	Field	Review	76	(Palliotti et al., 2014)	Italy	ST3, LT3	Plant/Region	Review
22	(Baronti et al., 2014)	Italy	ST2	Field	Experimental	77	(Tomaz et al., 2017)	Portugal	ST1, ST2	Field	Experimental
23	(Fuhrer et al., 2014)	Suisse	ST1	Region	Modeling	78	(Torres et al., 2017)	Spain	ST1, LT2	Plant	Experimental
24	(Londo and Johnson, 2014)	USA	LT2	Plant	Experimental	79	(Bigard et al., 2018)	France	LT2	Plant	Experimental
25	(Costa et al., 2016)	Portugal	ST1, ST2	Plant/Field/Region	Review	80	(Bonada et al., 2018)	Australia	ST1	Field	Experimental
26	(Meggio et al., 2014)	Italy	LT2	Plant	Experimental	81	(Poni et al., 2018)	Italy	ST3	Field	Review
27	(Pickering et al., 2014)	Canada	LT4	Sector	Expert judgement	82	(Chrysargyris et al., 2018)	Cyprus	ST1, ST2	Field	Experimental
28	(Şerdinescu et al., 2014)	Romania	ST2, ST3	Field	Experimental	83	(De Micco et al., 2018)	Italy	LT2	Plant	Experimental
29	(Dequin et al., 2017)	France	ST4	Farm	Review	84	(Dinis et al., 2018b).	Portugal	ST3	Plant	Experimental
30	(de C. Teixeira et al., 2014)	Brazil	ST3	Plant	Modeling	85	(Dinis et al., 2018a)	Portugal	ST3	Plant	Experimental
31	(Berdeja et al., 2015)	France	LT2	Plant	Experimental	86	(Fraga et al., 2018a)	Portugal	ST1	Field/Region	Modeling
32	(Corso et al., 2015)	Italy	LT2	Plant	Modeling	87	(Fraga and Santos, 2018)	Portugal	ST2	Field/Region	Modeling
33	(Delay et al., 2015)	France	LT1, LT4	Region	Expert judgement	88	(Franques et al., 2018)	Spain	ST4	Farm	Experimental
34	(Duchene, 2016)	France	LT2	Plant	Review	89	(Gil et al., 2018)	Chile	ST1, LT3, ST2	Field	Experimental
35	(Genesio et al., 2015)	Italy	ST2	Field	Experimental	90	(Malacarne et al., 2018)	Italy	LT2	Plant	Experimental
36	(Lobos et al., 2015)	Chile	ST3	Field	Experimental	91	(Phogat et al., 2018)	Australia	ST1	Region	Modeling

37	(Fleming et al., 2015)	Australia	-	Farm	Expert judgement	92	(Reshef et al., 2018)	Israel	LT3	Plant	Experimental
38	(Flexas et al., 2010)	Spain	LT2, ST1	Plant	Review	93	(Serra et al., 2014)	South Africa	LT2	Plant	Review
39	(Trigo-Córdoba et al., 2015)	Spain	ST1	Plant	Experimental	94	(Simonneau et al., 2017)	France	LT2	Plant	Review
40	(Carvalho-Santos et al., 2016)	Portugal	LT1	Region	Modeling	95	(Romero et al., 2018)	Spain	ST1, LT2	Plant	Experimental
41	(Ramos, 2016)	Spain	LT3	Region	Modeling	96	(Savi et al., 2018)	Italy	ST1	Field	Experimental
42	(Dal Santo et al., 2016)	Italy	LT2	Plant	Experimental	97	(Schelezki et al., 2018)	Australia	ST4	Farm	Experimental
43	(Galbreath, 2011)	Australia	ST1	Farm	Expert judgement	98	(Tomás et al., 2014)	Spain	ST3, LT2	Plant	Review
44	(Galbreath, 2014)	Australia	ST1	Farm	Expert judgement	99	(Torres et al., 2018a)	Spain	ST1, ST2	Plant	Experimental
45	(Galbreath et al., 2016)	Australia	LT2, ST3, LT3, LT1, ST1	Farm	Expert judgement	100	(Torres et al., 2018b)	Spain	ST2	Plant	Experimental
46	(Hopper et al., 2016)	USA	LT2	Plant	Experimental	101	(Wenter et al., 2018)	Italy	ST1	Field	Experimental
47	(Hunter et al., 2016)	South Africa	LT3	Plant / Field	Experimental	102	(Aparicio et al., 2019)	Malta	ST1	Field / Farm	Modeling
48	(Montana et al., 2016)	Argentina	LT1, ST1	Region	Experimental	103	(Buesa et al., 2019)	Spain	ST3	Field	Experimental
49	(Olen et al., 2016)	USA	LT1, ST1	Farm	Modeling	104	(Trouvelot et al., 2015)	France	ST2	Field	Review
50	(Resco et al., 2016)	Spain	ST1, LT2, LT3	Region	Modeling	105	(Fahey and Rogiers, 2019)	Australia	ST3	Plant	Experimental
51	(Holland and Smit, 2014)	Canada	ST3, LT1, LT2	Farm	Expert judgement	106	(van Leeuwen and Darriet, 2016)	France	LT1, LT2, LT3, ST3	Sector	Review
52	(Vaz et al., 2016)	Portugal	LT2	Field	Experimental	107	(Molitor et al., 2019)	Luxembourg	LT3	Field	Experimental
53	(Zhu et al., 2016)	Italy	LT1, LT2	Field/Farm/Region	Modeling	108	(Sabir, 2016)	Turkey	ST2	Plant	Experimental
54	(Amendola et al., 2017)	Italy	ST2	Field	Experimental	109	(Wolkovich et al., 2017)	USA	LT1, LT2	Plant/Region	Review
55	(Keller, 2010)	USA	ST1, LT3, ST2, ST3, LT1	Field/Region	Review	110	(Zhang et al., 2016)	France	LT2	Plant	Review
						111	(Valentini et al., 2019)	Italy	ST3	Field	Experimental

Bibliography :

- Alonso, A. D., and Liu, Y. (2013). Climate Change in the Wine Sector of an Ultra-Peripheral European Region: A Case Study. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37, 291–315. doi:10.1080/10440046.2012.712089.
- Amendola, C., Montagnoli, A., Terzaghi, M., Trupiano, D., Oliva, F., Baronti, S., et al. (2017). Short-term effects of biochar on grapevine fine root dynamics and arbuscular mycorrhizae production. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239, 236–245. doi:10.1016/j.agee.2017.01.025.
- Aparicio, J., Tenza-Abril, A. J., Borg, M., Galea, J., and Candela, L. (2019). Agricultural irrigation of vine crops from desalinated and brackish groundwater under an economic perspective. A case study in Siggiewi, Malta. *Science of The Total Environment* 650, 734–740. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.09.059.
- Attia, F., Martinez, L., and Lamaze, T. (2014). Foliar application of processed calcite particles improves leaf photosynthesis of potted *Vitis vinifera* L. (var. ‘Cot’) grown under water deficit. *J* 48, 237–245. doi:10.20870/oeno-one.2014.48.4.1691.
- Bardsley, D. K., Palazzo, E., and Pütz, M. (2018). Regional path dependence and climate change adaptation: A case study from the McLaren Vale, South Australia. *Journal of Rural Studies* 63, 24–33. doi:10.1016/j.jrurstud.2018.08.015.
- Baronti, S., Vaccari, F. P., Miglietta, F., Calzolari, C., Lugato, E., Orlandini, S., et al. (2014). Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy* 53, 38–44. doi:10.1016/j.eja.2013.11.003.
- Battaglini, A., Barbeau, G., Bindi, M., and Badeck, F.-W. (2009). European winegrowers’ perceptions of climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change* 9, 61–73. doi:10.1007/s10113-008-0053-9.
- Belliveau, S., Smit, B., and Bradshaw, B. (2006). Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change* 16, 364–378. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.003.
- Berdeja, M., Nicolas, P., Kappel, C., Dai, Z. W., Hilbert, G., Peccoux, A., et al. (2015). Water limitation and rootstock genotype interact to alter grape berry metabolism through transcriptome reprogramming. *Hortic Res* 2, 15012. doi:10.1038/hortres.2015.12.
- Bernardo, S., Dinis, L.-T., Machado, N., and Moutinho-Pereira, J. (2018). Grapevine abiotic stress assessment and search for sustainable adaptation strategies in Mediterranean-like climates. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 38. doi:10.1007/s13593-018-0544-0.
- Bigard, A., Berhe, D. T., Maoddi, E., Sire, Y., Boursiquot, J.-M., Ojeda, H., et al. (2018). *Vitis vinifera* L. Fruit Diversity to Breed Varieties Anticipating Climate Changes. *Front. Plant Sci.* 9, 455. doi:10.3389/fpls.2018.00455.
- Bonada, M., Buesa, I., Moran, M. A., and Sadras, V. O. (2018). Interactive effects of warming and water deficit on Shiraz vine transpiration in the Barossa Valley, Australia. *OENE One* 52. doi:10.20870/oeno-one.2018.52.2.2141.
- Buesa, I., Caccavello, G., Basile, B., Merli, M. C., Poni, S., Chirivella, C., et al. (2019). Delaying berry ripening of Bobal and Tempranillo grapevines by late leaf removal in a semi-arid and temperate-warm climate under different water regimes: Late leaf removal effects in Bobal and Tempranillo. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 25, 70–82. doi:10.1111/ajgw.12368.
- Caravia, L., Collins, C., Petrie, P. R., and Tyerman, S. D. (2016). Application of shade treatments during Shiraz berry ripening to reduce the impact of high temperature: Shade reduces impact of high temperature on Shiraz. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 22, 422–437. doi:10.1111/ajgw.12248.

- Caravia, L., Pagay, V., Collins, C., and Tyerman, S. D. (2017). Application of sprinkler cooling within the bunch zone during ripening of Cabernet Sauvignon berries to reduce the impact of high temperature: Sprinkler cooling of Cabernet Sauvignon. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 23, 48–57. doi:10.1111/ajgw.12255.
- Carvalho, L. C., Coito, J. L., Gonçalves, E. F., Lopes, C., and Amâncio, S. (2018). Physiological and agronomical responses to environmental fluctuations of two Portuguese grapevine varieties during three field seasons. *Ciência Téc. Vitiv.* 33, 1–14. doi:10.1051/ctv/20183301001.
- Carvalho, L. C., Silva, M., Coito, J. L., Rocheta, M. P., and Amâncio, S. (2017). Design of a Custom RT-qPCR Array for Assignment of Abiotic Stress Tolerance in Traditional Portuguese Grapevine Varieties. *Front. Plant Sci.* 8. doi:10.3389/fpls.2017.01835.
- Carvalho-Santos, C., Nunes, J. P., Monteiro, A. T., Hein, L., and Honrado, J. P. (2016). Assessing the effects of land cover and future climate conditions on the provision of hydrological services in a medium-sized watershed of Portugal: Impacts of Land Cover and Future Climate on Hydrological Services. *Hydrological Processes* 30, 720–738. doi:10.1002/hyp.10621.
- Chrysargyris, A., Xylia, P., Litskas, V., Mandoulaki, A., Antoniou, D., Boyias, T., et al. (2018). Drought stress and soil management practices in grapevines in Cyprus under the threat of climate change. *Journal of Water and Climate Change*. doi:10.2166/wcc.2018.135.
- Cirigliano, P., Vincenza Chiriaco, M., CMCC – Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici, Nunez, A., Universidad Autonoma de Chihuahua, Dal Monte, G., et al. (2017). Efecto combinado de la aplicación de riego y compost sobre la composición de la baya Montepulciano en un entorno volcánico de la región de Lacio (Italia central). *Ciencia e investigación agraria* 44, 195–206. doi:10.7764/rcia.v44i2.1691.
- Clingeffer, P. R. (2010). Plant management research: status and what it can offer to address challenges and limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 25–32. doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00075.x.
- Concepción Ramos, M. (2016). Soil losses in rainfed Mediterranean vineyards under climate change scenarios. The effects of drainage terraces. *AIMS Agriculture and Food* 1, 124–143. doi:10.3934/agrfood.2016.2.124.
- Corso, M., Vannozzi, A., Maza, E., Vitulo, N., Meggio, F., Pitacco, A., et al. (2015). Comprehensive transcript profiling of two grapevine rootstock genotypes contrasting in drought susceptibility links the phenylpropanoid pathway to enhanced tolerance. *EXBOTJ* 66, 5739–5752. doi:10.1093/jxb/erv274.
- Costa, J. M., Vaz, M., Escalona, J., Egipto, R., Lopes, C., Medrano, H., et al. (2016). Modern viticulture in southern Europe: Vulnerabilities and strategies for adaptation to water scarcity. *Agricultural Water Management* 164, 5–18. doi:10.1016/j.agwat.2015.08.021.
- Dal Santo, S., Palliotti, A., Zenoni, S., Tornielli, G. B., Fasoli, M., Paci, P., et al. (2016). Distinct transcriptome responses to water limitation in isohydric and anisohydric grapevine cultivars. *BMC Genomics* 17, 815. doi:10.1186/s12864-016-3136-x.
- de C. Teixeira, A. H., Tonietto, J., Pereira, G. E., Hernandez, F. B. T., Angelotti, F., and Lopes, H. L. (2014). AGRO-CLIMATIC SUITABILITY DELIMITATION FOR TABLE AND WINE GRAPE CROPS UNDER IRRIGATION CONDITIONS IN NORTHEASTERN BRAZIL. *Acta Hortic.*, 277–286. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1038.33.
- De Micco, V., Zalloni, E., Battipaglia, G., Erbaggio, A., Scognamiglio, P., Caputo, R., et al. (2018). Rootstock effect on tree-ring traits in grapevine under a climate change scenario. *IAWA Journal* 39, 145–155. doi:10.1163/22941932-20170199.

- Delay, E., Piou, C., and Quenol, H. (2015). The mountain environment, a driver for adaptation to climate change. *Land Use Policy* 48, 51–62. doi:10.1016/j.landusepol.2015.05.008.
- Dequin, S., Escudier, J.-L., Bely, M., Noble, J., Albertin, W., Masneuf-Pomarède, I., et al. (2017). How to adapt winemaking practices to modified grape composition under climate change conditions. *I* 51, 205–214. doi:10.20870/oenone.2017.51.2.1584.
- Diffenbaugh, N. S., White, M. A., Jones, G. V., and Ashfaq, M. (2011). Climate adaptation wedges: a case study of premium wine in the western United States. *Environ. Res. Lett.* 6, 024024. doi:10.1088/1748-9326/6/2/024024.
- Dinis, L.-T., Bernardo, S., Luzio, A., Pinto, G., Meijón, M., Pintó-Marijuan, M., et al. (2018a). Kaolin modulates ABA and IAA dynamics and physiology of grapevine under Mediterranean summer stress. *Journal of Plant Physiology* 220, 181–192. doi:10.1016/j.jplph.2017.11.007.
- Dinis, L.-T., Malheiro, A. C., Luzio, A., Fraga, H., Ferreira, H., Gonçalves, I., et al. (2018b). Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin-foliar application: water relations, photosynthesis and oxidative damage. *Photosynthetica* 56, 641–651. doi:10.1007/s11099-017-0714-3.
- dos Santos, T. P., Lopes, C. M., Lucília Rodrigues, M., de Souza, C. R., Ricardo-da-Silva, J. M., Maroco, J. P., et al. (2007). Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Scientia Horticulturae* 112, 321–330. doi:10.1016/j.scienta.2007.01.006.
- Duchene, E. (2016). How can grapevine genetics contribute to the adaptation to climate change? *OENO One* 50. doi:10.20870/oenone.2016.50.3.98.
- Duchene, E., Butterlin, G., Dumas, V., and Merdinoglu, D. (2012). Towards the adaptation of grapevine varieties to climate change: QTLs and candidate genes for developmental stages. *Theor. Appl. Genet.* 124, 623–635. doi:10.1007/s00122-011-1734-1.
- Fahey, D. J., and Rogiers, S. Y. (2019). Di-1-p-menthene reduces grape leaf and bunch transpiration. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 25, 134–141. doi:10.1111/ajgw.12371.
- Fleming, A., Rickards, L., and Dowd, A.-M. (2015). Understanding convergence and divergence in the framing of climate change responses: An analysis of two wine companies. *Environmental Science & Policy* 51, 202–214. doi:10.1016/j.envsci.2015.04.003.
- Flexas, J., Galmà, J., Gallà, A., Gulà, A., Pou, A., Ribas-Carbo, M., et al. (2010). Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 106–121. doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00057.x.
- Fraga, H., García de Cortázar Aauri, I., and Santos, J. A. (2018a). Viticultural irrigation demands under climate change scenarios in Portugal. *Agricultural Water Management* 196, 66–74. doi:10.1016/j.agwat.2017.10.023.
- Fraga, H., Pinto, J. G., and Santos, J. A. (2018b). Climate change projections for chilling and heat forcing conditions in European vineyards and olive orchards: a multi-model assessment. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-018-2337-5.
- Fraga, H., and Santos, J. A. (2018). Vineyard mulching as a climate change adaptation measure: Future simulations for Alentejo, Portugal. *Agricultural Systems* 164, 107–115. doi:10.1016/j.agsy.2018.04.006.
- Franques, J., Araque, I., El Khoury, M., Lucas, P. M., Reguant, C., and Bordons, A. (2018). Selection and characterization of autochthonous strains of *Oenococcus oeni* for vinification in Priorat (Catalonia, Spain). *OENO One* 52, 45–56. doi:10.20870/oenone.2018.52.1.1908.

- Fuhrer, J., Smith, P., and Gobiet, A. (2014). Implications of climate change scenarios for agriculture in alpine regions — A case study in the Swiss Rhone catchment. *Science of The Total Environment* 493, 1232–1241. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.06.038.
- Galbreath, J. (2011). To What Extent is Business Responding to Climate Change? Evidence from a Global Wine Producer. *J Bus Ethics* 104, 421–432. doi:10.1007/s10551-011-0919-5.
- Galbreath, J. (2014). Climate Change Response: Evidence from the Margaret River Wine Region of Australia. *Business Strategy and the Environment* 23, 89–104. doi:10.1002/bse.1762.
- Galbreath, J., Charles, D., and Oczkowski, E. (2016). The Drivers of Climate Change Innovations: Evidence from the Australian Wine Industry. *J Bus Ethics* 135, 217–231. doi:10.1007/s10551-014-2461-8.
- Genesio, L., Miglietta, F., Baronti, S., and Vaccari, F. P. (2015). Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 201, 20–25. doi:10.1016/j.agee.2014.11.021.
- Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Vitaliotou, M., Lalas, D. P., Theloudis, I., et al. (2017). Climate change impacts and adaptation options for the Greek agriculture in 2021–2050: A monetary assessment. *Climate Risk Management* 16, 164–182. doi:10.1016/j.crm.2017.02.002.
- Gil, P. M., Lobos, P., Durán, K., Olguín, J., Cea, D., and Schaffer, B. (2018). Partial root-zone drying irrigation, shading, or mulching effects on water savings, productivity and quality of ‘Syrah’ grapevines. *Scientia Horticulturae* 240, 478–483. doi:10.1016/j.scienta.2018.06.050.
- Grantham, T. E., Merenlender, A. M., and Resh, V. H. (2010). Climatic influences and anthropogenic stressors: an integrated framework for streamflow management in Mediterranean-climate California, USA. *Freshw. Biol.* 55, 188–204. doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02379.x.
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., et al. (2013). Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 6907–6912.
- Holland, T., and Smit, B. (2014). Recent climate change in the Prince Edward County winegrowing region, Ontario, Canada: implications for adaptation in a fledgling wine industry. *Reg Environ Change* 14, 1109–1121. doi:10.1007/s10113-013-0555-y.
- Hopper, D. W., Ghan, R., Schlauch, K. A., and Cramer, G. R. (2016). Transcriptomic network analyses of leaf dehydration responses identify highly connected ABA and ethylene signaling hubs in three grapevine species differing in drought tolerance. *BMC Plant Biology* 16, 118. doi:10.1186/s12870-016-0804-6.
- Hunter, J. J., Volschenk, C. G., and Zorer, R. (2016). Vineyard row orientation of *Vitis vinifera* L. cv. Shiraz/101-14 Mgt: Climatic profiles and vine physiological status. *Agricultural and Forest Meteorology* 228–229, 104–119. doi:10.1016/j.agrformet.2016.06.013.
- Kapur, B., Steduto, P., and Todorovic, M. (2007). Prediction of Climatic Change for the Next 100 Years in the Apulia Region, Southern Italy. *Ital J Agronomy* 2, 365. doi:10.4081/ija.2007.365.
- Keller, M. (2010). Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 56–69. doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00077.x.

- Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., and 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. doi:10.1016/j.agee.2012.10.008.
- Levy, M. A., and Lubell, M. N. (2018). Innovation, cooperation, and the structure of three regional sustainable agriculture networks in California. *Reg Environ Change* 18, 1235–1246. doi:10.1007/s10113-017-1258-6.
- Lobos, G. A., Acevedo-Opazo, C., Guajardo-Moreno, A., Valdés-Gómez, H., Taylor, J. A., and Laurie, V. F. (2015). Effects of kaolin-based particle film and fruit zone netting on Cabernet Sauvignon grapevine physiology and fruit quality. *J* 49, 137–144. doi:10.20870/oeno-one.2015.49.2.86.
- Londo, J. P., and Johnson, L. M. (2014). Variation in the chilling requirement and budburst rate of wild *Vitis* species. *Environmental and Experimental Botany* 106, 138–147. doi:10.1016/j.envexpbot.2013.12.012.
- Malacarne, G., Pilati, S., Valentini, S., Asnicar, F., Moretto, M., Sonego, P., et al. (2018). Discovering Causal Relationships in Grapevine Expression Data to Expand Gene Networks. A Case Study: Four Networks Related to Climate Change. *Front. Plant Sci.* 9. doi:10.3389/fpls.2018.01385.
- Martínez-Lüscher, J., Chen, C. C. L., Brillante, L., and Kurtural, S. K. (2017). Partial Solar Radiation Exclusion with Color Shade Nets Reduces the Degradation of Organic Acids and Flavonoids of Grape Berry (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65, 10693–10702. doi:10.1021/acs.jafc.7b04163.
- Medrano, H., Tomás, M., Martorell, S., Escalona, J.-M., Pou, A., Fuentes, S., et al. (2015). Improving water use efficiency of vineyards in semi-arid regions. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 499–517. doi:10.1007/s13593-014-0280-z.
- Meggio, F., Prinsi, B., Negri, A. S., Lorenzo, G. S. D., Lucchini, G., Pitacco, A., et al. (2014). Biochemical and physiological responses of two grapevine rootstock genotypes to drought and salt treatments. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 20, 310–323. doi:10.1111/ajgw.12071.
- Milla-Tapia, A., Gómez, S., Moncada, X., León, P., Ibacache, A., Rosas, M., et al. (2013). Naturalised grapevines collected from arid regions in Northern Chile exhibit a high level of genetic diversity. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 19, 299–310. doi:10.1111/ajgw.12020.
- Mirás-Avalos, J. M., Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., and Orriols-Fernández, I. (2016). Irrigation effects on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. ‘Albariño’ under the humid climate of Galicia. *OENO One* 50. doi:10.20870/oeno-one.2016.50.4.63.
- Mirás-Avalos, J. M., Uriarte, D., Lakso, A. N., and Intrigliolo, D. S. (2018). Modeling grapevine performance with ‘VitiSim’, a weather-based carbon balance model: Water status and climate change scenarios. *Scientia Horticulturae* 240, 561–571. doi:10.1016/j.scienta.2018.06.065.
- Molitor, D., Schultz, M., Mannes, R., Pallez-Barthel, M., Hoffmann, L., and Beyer, M. (2019). Semi-Minimal Pruned Hedge: A Potential Climate Change Adaptation Strategy in Viticulture. *Agronomy* 9, 173. doi:10.3390/agronomy9040173.
- Montana, E., Diaz, H. P., and Hurlbert, M. (2016). Development, local livelihoods, and vulnerabilities to global environmental change in the South American Dry Andes. *Reg. Envir. Chang.* 16, 2215–2228. doi:10.1007/s10113-015-0888-9.
- Montaña, E., Diaz, H. P., and Hurlbert, M. (2016). Development, local livelihoods, and vulnerabilities to global environmental change in the South American Dry Andes. *Reg Environ Change* 16, 2215–2228. doi:10.1007/s10113-015-0888-9.

- Mosedale, J. R., Abernethy, K. E., Smart, R. E., Wilson, R. J., and Maclean, I. M. D. (2016). Climate change impacts and adaptive strategies: lessons from the grapevine. *Global Change Biology* 22, 3814–3828. doi:10.1111/gcb.13406.
- Neethling, E., Petitjean, T., Quénel, H., and 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. doi:10.1007/s11027-015-9698-0.
- Nicholas, K. A., and Durham, W. H. (2012). Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: Insights from winegrowing in Northern California. *Global Environmental Change* 22, 483–494. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.01.001.
- Olen, B., Wu, J., and Langpap, C. (2016). Irrigation Decisions for Major West Coast Crops: Water Scarcity and Climatic Determinants. *American Journal of Agricultural Economics* 98, 254–275. doi:10.1093/ajae/aav036.
- Paciello, P., Mencarelli, F., Palliotti, A., Ceccantoni, B., Thibon, C., Darriet, P., et al. (2017). Nebulized water cooling of the canopy affects leaf temperature, berry composition and wine quality of Sauvignon blanc: Nebulized water cooling of the canopy affects wine quality of Sauvignon blanc. *J. Sci. Food Agric.* 97, 1267–1275. doi:10.1002/jsfa.7860.
- Pagliarani, C., Vitali, M., Ferrero, M., Vitulo, N., Incarbone, M., Lovisolò, C., et al. (2017). The Accumulation of miRNAs Differentially Modulated by Drought Stress Is Affected by Grafting in Grapevine. *Plant Physiol* 173, 2180–2195. doi:10.1104/pp.16.01119.
- Palliotti, A., Panara, F., Famiani, F., Sabbatini, P., Howell, G. S., Silvestroni, O., et al. (2013). Postveraison Application of Antitranspirant Di-1-*p*-Menthene to Control Sugar Accumulation in Sangiovese Grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 64, 378–385. doi:10.5344/ajev.2013.13015.
- Palliotti, A., Tombesi, S., Silvestroni, O., Lanari, V., Gatti, M., and Poni, S. (2014). Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review. *Scientia Horticulturae* 178, 43–54. doi:10.1016/j.scienta.2014.07.039.
- Petrie, P. R., Brooke, S. J., Moran, M. A., and Sadras, V. O. (2017). Pruning after budburst to delay and spread grape maturity. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 23, 378–389. doi:10.1111/ajgw.12303.
- Phogat, V., Cox, J. W., and Šimůnek, J. (2018). Identifying the future water and salinity risks to irrigated viticulture in the Murray-Darling Basin, South Australia. *Agricultural Water Management* 201, 107–117. doi:10.1016/j.agwat.2018.01.025.
- Pickering, K., Plummer, R., and Pickering, G. (2014). DETERMINING ADAPTIVE CAPACITY TO CLIMATE CHANGE IN THE GRAPE AND WINE INDUSTRY. 7.
- Pieri, P., Lebon, E., and Brisson, N. (2012). CLIMATE CHANGE IMPACT ON FRENCH VINEYARDS AS PREDICTED BY MODELS. *Acta Horticulturae*, 29–37. doi:10.17660/ActaHortic.2012.931.2.
- Poni, S., Gatti, M., Palliotti, A., Dai, Z., Duchêne, E., Truong, T.-T., et al. (2018). Grapevine quality: A multiple choice issue. *Scientia Horticulturae* 234, 445–462. doi:10.1016/j.scienta.2017.12.035.
- Ramos, M. C., and Martínez-Casasnovas, J. A. (2010). Soil water balance in rainfed vineyards of the Penedès region (Northeastern Spain) affected by rainfall characteristics and land levelling: influence on grape yield. *Plant Soil* 333, 375–389. doi:10.1007/s11104-010-0353-y.

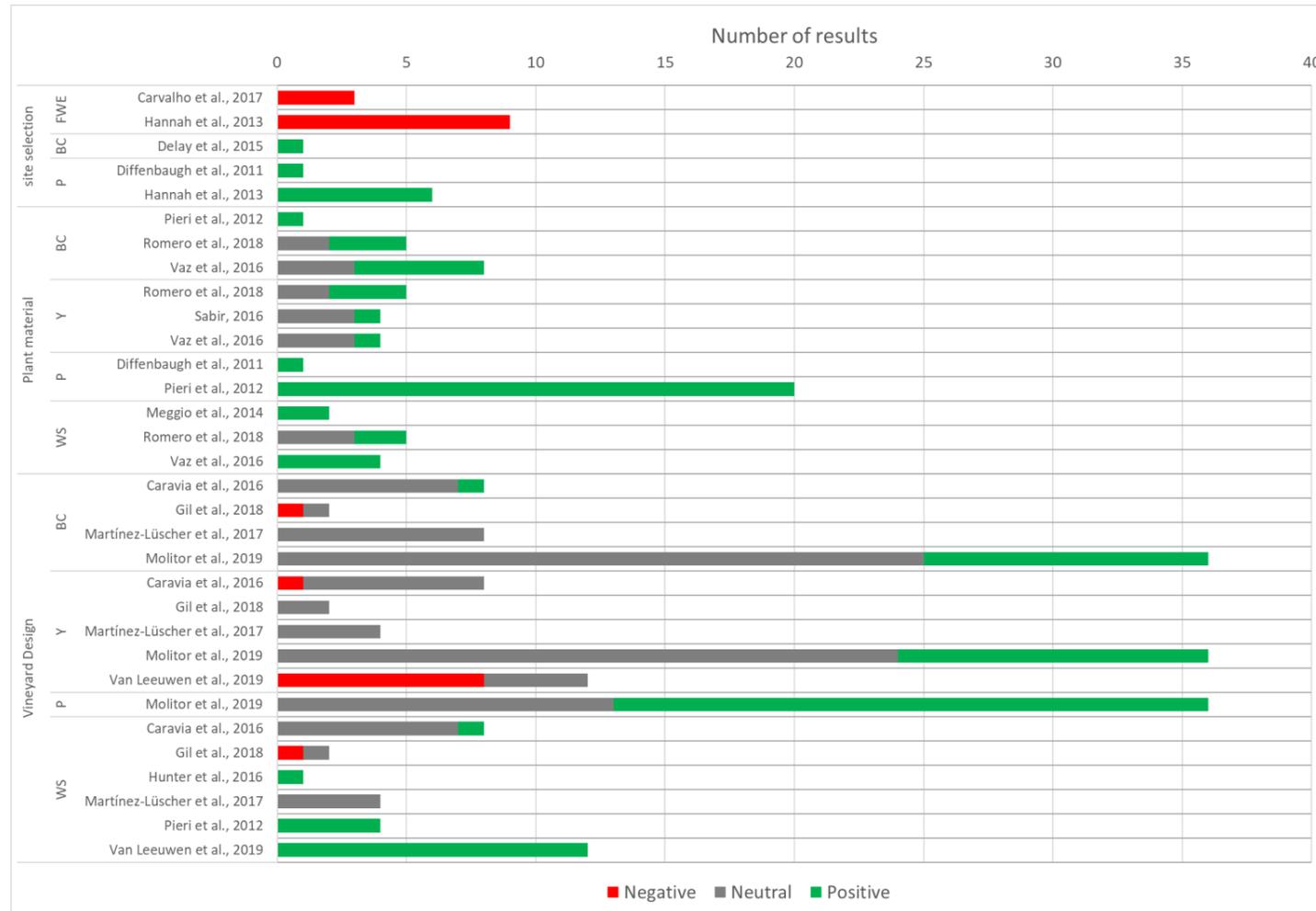
- Raymond, C. M., and Spoehr, J. (2013). The acceptability of climate change in agricultural communities: Comparing responses across variability and change. *Journal of Environmental Management* 115, 69–77. doi:10.1016/j.jenvman.2012.11.003.
- Resco, P., Iglesias, A., Bardají, I., and Sotés, V. (2016). Exploring adaptation choices for grapevine regions in Spain. *Reg Environ Change* 16, 979–993. doi:10.1007/s10113-015-0811-4.
- Reshef, N., Agam, N., and Fait, A. (2018). Grape Berry Acclimation to Excessive Solar Irradiance Leads to Repartitioning between Major Flavonoid Groups. *J. Agric. Food Chem.* 66, 3624–3636. doi:10.1021/acs.jafc.7b04881.
- Romero, P., Botía, P., and Navarro, J. M. (2018). Selecting rootstocks to improve vine performance and vineyard sustainability in deficit irrigated Monastrell grapevines under semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 209, 73–93. doi:10.1016/j.agwat.2018.07.012.
- Ronco, P., Zennaro, F., Torresan, S., Critto, A., Santini, M., Trabucco, A., et al. (2017). A risk assessment framework for irrigated agriculture under climate change. *Advances in Water Resources* 110, 562–578. doi:10.1016/j.advwatres.2017.08.003.
- Sabir, A. (2016). Vegetative and Reproductive Growth Responses of Grapevine cv. “Italia” (*Vitis vinifera* L.) Grafted on Different Rootstocks to Contrasting Soil Water Status. 13.
- Sacchelli, S., Fabbrizzi, S., and Menghini, S. (2016). Climate Change, Wine and Sustainability: A Quantitative Discourse Analysis of the International Scientific Literature. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 8, 167–175. doi:10.1016/j.aaspro.2016.02.090.
- Santesteban, L. G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Loidi, M., and Royo, J. B. (2017). Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semiarid conditions. *OENO One* 51, 191–203. doi:10.20870/oenone.2017.51.2.1583.
- Savi, T., Petruzzellis, F., Martellos, S., Stenni, B., Dal Borgo, A., Zini, L., et al. (2018). Vineyard water relations in a karstic area: deep roots and irrigation management. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 263, 53–59. doi:10.1016/j.agee.2018.05.009.
- Schelezki, O. J., Smith, P. A., Hranilovic, A., Bindon, K. A., and Jeffery, D. W. (2018). Comparison of consecutive harvests versus blending treatments to produce lower alcohol wines from Cabernet Sauvignon grapes: Impact on polysaccharide and tannin content and composition. *Food Chemistry* 244, 50–59. doi:10.1016/j.foodchem.2017.10.024.
- Șerdinescu, A., Pircălabu, L., and Fotescu, L. (2014). Influence of soil maintenance systems and fruit load on grapes quality under drought conditions. *Scientific Papers - Series B, Horticulture*, 201–204.
- Serra, I., Strever, A., Myburgh, P. A., and Deloire, A. (2014). Review: the interaction between rootstocks and cultivars (*Vitis vinifera* L.) to enhance drought tolerance in grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 20, 1–14. doi:10.1111/ajgw.12054.
- Simonneau, T., Lebon, E., Coupel-Ledru, A., Marguerit, E., Rossdeutsch, L., and Ollat, N. (2017). Adapting plant material to face water stress in vineyards: which physiological targets for an optimal control of plant water status? *OENO One* 51, 167–179. doi:10.20870/oenone.2017.51.2.1870.
- Stoll, M., Bischoff-Schaefer, M., Lafontaine, M., Tittmann, S., and Henschke, J. (2013). IMPACT OF VARIOUS LEAF AREA MODIFICATIONS ON BERRY MATURATION IN VITIS VINIFERA L. “RIESLING.” *Acta Hort.*, 293–299. doi:10.17660/ActaHortic.2013.978.34.

- Tissot, C., Neethling, E., Rouan, M., Barbeau, G., Quenol, H., and Le Coq, C. (2017). Modeling Environmental Impacts on Viticultural Ecosystems: A First Case Study in a Regulated Wine Producing Area. *Int. J. Agric. Environ. Inf. Syst.* 8, 1–20. doi:10.4018/IJAEIS.2017070101.
- Tomás, M., Medrano, H., Escalona, J. M., Martorell, S., Pou, A., Ribas-Carbó, M., et al. (2014). Variability of water use efficiency in grapevines. *Environmental and Experimental Botany* 103, 148–157. doi:10.1016/j.envexpbot.2013.09.003.
- Tomaz, A., Pacheco, C. A., and Coletto Martinez, J. M. (2017). Influence of cover cropping on water uptake dynamics in an irrigated Mediterranean vineyard: Cover Cropping and Water Uptake Dynamics. *Irrig. and Drain.* 66, 387–395. doi:10.1002/ird.2115.
- Torres, N., Goicoechea, N., and Carmen Antolín, M. (2018a). Influence of irrigation strategy and mycorrhizal inoculation on fruit quality in different clones of Tempranillo grown under elevated temperatures. *Agricultural Water Management* 202, 285–298. doi:10.1016/j.agwat.2017.12.004.
- Torres, N., Goicoechea, N., Zamarreño, A. M., and Carmen Antolín, M. (2018b). Mycorrhizal symbiosis affects ABA metabolism during berry ripening in *Vitis vinifera* L. cv. Tempranillo grown under climate change scenarios. *Plant Science* 274, 383–393. doi:10.1016/j.plantsci.2018.06.009.
- Torres, N., Hilbert, G., Luquin, J., Goicoechea, N., and Antolín, M. C. (2017). Flavonoid and amino acid profiling on *Vitis vinifera* L. cv Tempranillo subjected to deficit irrigation under elevated temperatures. *Journal of Food Composition and Analysis* 62, 51–62. doi:10.1016/j.jfca.2017.05.001.
- Trigo-Córdoba, E., Bouzas-Cid, Y., Orriols-Fernández, I., and Mirás-Avalos, J. M. (2015). Effects of deficit irrigation on the performance of grapevine (*Vitis vinifera* L.) cv. ‘Godello’ and ‘Treixadura’ in Ribeiro, NW Spain. *Agricultural Water Management* 161, 20–30. doi:10.1016/j.agwat.2015.07.011.
- Trouvelot, S., Bonneau, L., Redecker, D., van Tuinen, D., Adrian, M., and Wipf, D. (2015). Arbuscular mycorrhiza symbiosis in viticulture: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1449–1467. doi:10.1007/s13593-015-0329-7.
- Valentini, G., Allegro, G., Pastore, C., Colucci, E., and Filippetti, I. (2019). Post-veraison trimming slow down sugar accumulation without modifying phenolic ripening in Sangiovese vines: Post-veraison trimming of Sangiovese vines. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99, 1358–1365. doi:10.1002/jsfa.9311.
- van Leeuwen, C., and Darriet, P. (2016). The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *Journal of Wine Economics* 11, 150–167. doi:10.1017/jwe.2015.21.
- Van Leeuwen, C., Pieri, P., Gowdy, M., Ollat, N., and Roby, J.-P. (2019). Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a context of climate change. *OENO One* 53, 129–146. doi:10.20870/oenone.2019.53.2.2420.
- Vaz, M., Coelho, R., Rato, A., Samara-Lima, R., Silva, L. L., Campostrini, E., et al. (2016). Adaptive strategies of two Mediterranean grapevines varieties (Aragonez syn. Tempranillo and Trincadeira) face drought: physiological and structural responses. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 28, 205–220. doi:10.1007/s40626-016-0074-6.

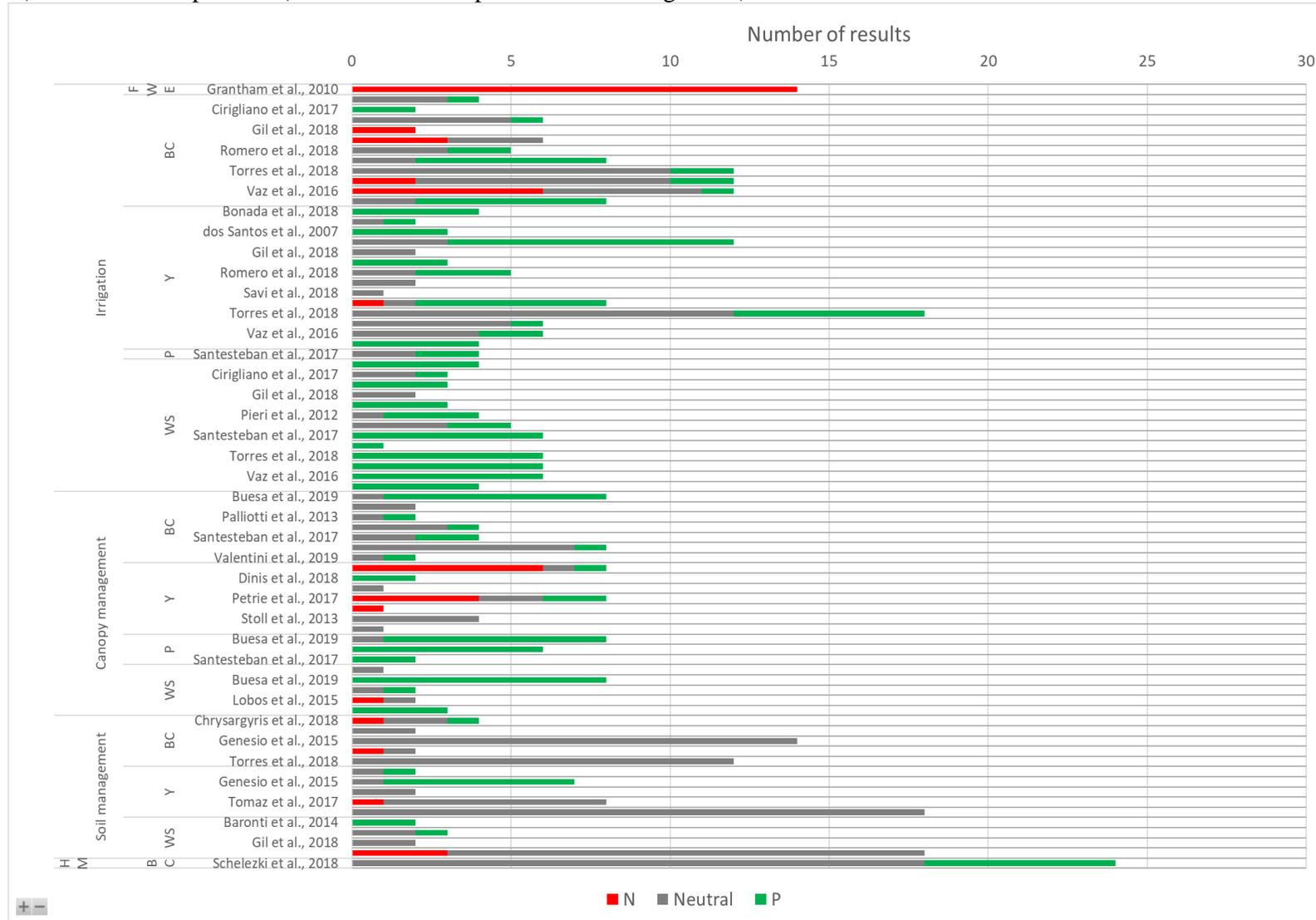
- Wenter, A., Zanotelli, D., Montagnani, L., Tagliavini, M., and Andreotti, C. (2018). Effect of different timings and intensities of water stress on yield and berry composition of grapevine (cv. Sauvignon blanc) in a mountain environment. *Scientia Horticulturae* 236, 137–145. doi:10.1016/j.scienta.2018.03.037.
- Wolkovich, E. M., Burge, D. O., Walker, M. A., and Nicholas, K. A. (2017). Phenological diversity provides opportunities for climate change adaptation in winegrapes. *Journal of Ecology* 105, 905–912. doi:10.1111/1365-2745.12786.
- Zhang, L., Marguerit, E., Rossdeutsch, L., Ollat, N., and Gambetta, G. A. (2016). The influence of grapevine rootstocks on scion growth and drought resistance. *Theor. Exp. Plant Physiol.* 28, 143–157. doi:10.1007/s40626-016-0070-x.
- Zhu, X., Moriondo, M., van Ierland, E. C., Trombi, G., and Bindi, M. (2016). A model-based assessment of adaptation options for Chianti wine production in Tuscany (Italy) under climate change. *Reg Environ Change* 16, 85–96. doi:10.1007/s10113-014-0622-z.

Supplementary Figure 1. Number of results by study and by adaptation indicating a quantitative impact of adaptation on various outputs (FWE: freshwater ecosystem, BC: berry composition, Y: yield, P: phenology, WS: water status), summarized in Figure 5 See in the material and method (Section 2) the signification of Negative (N), Neutral and Positive (P) effects.

A) Long-term adaptations



B) Short term adaptations (HM: Harvest and post-harvest management)



Supplementary Table 2. Complete list of indicators of evaluation with associated references (manag = management, select = selection)

		Adaptations						
		Irrigation	Plant material	Canopy manag.	Soil manag.	Vineyard design	Farm strategy	Site select.
Plant scale	Gas exchanges*	1, 2, 3, 4, 5, 6	4	7, 9, 10, 11, 12	8, 2	13, 14, 44		
	Net photosynthesis	3, 4, 5, 15	4, 16	7, 17,8, 10, 12	15, 8	15, 13, 14, 44		
	Water Status	1, 3, 4, 5, 6, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 16, 32	4, 16, 21, 23	7, 17, 24,8, 10, 12	15, 8, 20, 22, 25	15, 13, 14, 21		
	Genetic		26, 27, 28, 29					
	Microclimate	18		10, 11		14, 44		
	Plant growth	1, 18, 39, 4, 5, 6	23, 4, 39		34			
	Root dynamics	4	4		30, 25			
	Carbon reserve			12, 31				
	Field scale	Phenology / Suitability	2, 32	33, 21, 36	17, 32, 34	22	35	
Yield		1, 2, 3, 4, 5, 6, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 25, 32, 38	4, 16, 39	10, 12, 17, 31, 32, 34, 43	2, 15, 25, 22, 40	15, 35, 41		
Berry / Wine composition		2, 20, 18, 15, 16, 32, 3, 4, 22, 5, 6	4, 16, 21, 42	17, 32, 34, 31, 43, 12, 7	2, 20, 40, 15, 22	13, 15, 35, 44	45	46
Soil properties**		3, 4, 5	4		30, 25			
Soil biological properties		22			30, 22			
Water use requirement		47, 5, 38						
Run off								48
Farm scale		Gross income	3, 49, 50, 51	50, 51, 52	50		50	50, 51, 52
	Cost	49, 50, 51	50, 51, 52			50	50, 51, 52	50
	Net revenue	5, 49, 50, 51	50, 51, 52	50		50, 41	50, 51, 52	50, 41
	Labour							46
	Vulnerability	53, 54, 55	53	53	53	53	53, 56	53, 54
Regional scale	Freshwater ecosystem	57						37, 58
	Erosion							48, 58
	Pollution (N, salinity)	47						58
	Economic income		59					59

*A_{CO2}, g_s, WUEi, transpiration, ** soil water content, CEC, P, N, pH, particle size, Corg

-
- 1 Bonada et al., 2018
 - 2 Chrysargyris et al., 2018
 - 3 Mirás-Avalos et al., 2016
 - 4 Romero et al., 2018
 - 5 Trigo-Córdoba et al., 2015
 - 6 Wenter et al., 2018
 - 7 Lobos et al., 2015
 - 8 Baronti et al., 2014
 - 9 Attia et al., 2014
 - 10 Dinis et al., 2018
 - 11 Fahey and Rogiers, 2019
 - 12 Palliotti et al., 2013
 - 13 Caravia et al., 2016
 - 14 Hunter et al., 2016
 - 15 Gil et al., 2018
 - 16 Vaz et al., 2016
 - 17 Buesa et al., 2019
 - 18 dos Santos et al., 2007
 - 19 Savi et al., 2018
 - 20 Cirigliano et al., 2017
 - 21 Pieri et al., 2012
 - 22 Torres et al., 2018
 - 23 Meggio et al., 2014
 - 24 de C. Teixeira et al., 2014
 - 25 Tomaz et al., 2017
 - 26 Carvalho et al., 2017
 - 27 Duchene et al., 2012
 - 28 Malacarne et al., 2018
 - 29 Milla-Tapia et al., 2013
 - 30 Amendola et al., 2017
 - 31 Valentini et al., 2019
 - 32 Santesteban et al., 2017
 - 33 Wolkovich et al., 2017
 - 34 Petrie et al., 2017
 - 35 Molitor et al., 2019
 - 36 Diffenbaugh et al., 2011
 - 37 Hannah et al., 2013
 - 38 Fraga et al., 2018
 - 39 Sabir, 2016
 - 40 Genesio et al., 2015
 - 41 Van Leeuwen et al., 2019
 - 42 Berdeja et al., 2015
 - 43 Stoll et al., 2013
 - 44 Martínez-Lüscher et al., 2017
 - 45 Schelezki et al., 2018
 - 46 Delay et al., 2015
 - 47 Phogat et al., 2018
 - 48 Concepción Ramos, 2016
 - 49 Aparicio et al., 2019
 - 50 Galbreath et al., 2016
 - 51 Sacchelli et al., 2016
 - 52 Georgopoulou et al., 2017
 - 53 Nicholas and Durham, 2012; Lereboullet et al., 2013; Neethling et al., 2017
 - 54 Montaña et al., 2016
 - 55 Ronco et al., 2017
 - 56 Pickering et al., 2014
 - 57 Grantham et al., 2010
 - 58 Carvalho-Santos et al., 2016
 - 59 Zhu et al., 2016

Annexe C

Modifications apportées au modèle WaLIS

1. Améliorations et calibration du modèle WaLIS

Le modèle WaLIS (Water baLance for Intercropped Systems) a été utilisé dans plusieurs études pour simuler la fraction d'eau disponible dans le sol (FTSW) d'un système de vigne enherbée (Celette et al., 2010; Gaudin et al., 2014; Guilpart et al., 2014; Andrieux et al., 2015; Delpuech and Metay, 2018). Il a été choisi au cours de cette thèse pour sa représentation simple du système, basée sur un nombre limité de paramètres dont l'accès était possible sur le terrain d'étude. Cependant, nous constatons deux limites principales pour son application dans le bassin versant du Rieutort :

- 1) La dynamique de l'enherbement n'est représentée que sur des surfaces semées, principalement gérées par tonte ou destruction définitive en fin d'hiver. Or dans la zone d'étude, l'enherbement est majoritairement spontané et géré par des travaux réguliers du sol au cours de la saison afin de limiter la concurrence hydrique avec la vigne. Les pratiques d'entretien du sol permettent également de piloter la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, soit en favorisant l'installation d'un couvert végétal à l'automne, soit par un travail superficiel du sol au printemps et en été avant un épisode pluvieux.
- 2) Le modèle WaLIS est particulièrement sensible au paramétrage de la quantité d'eau maximale dans le sol disponible pour la vigne (TTSW) (Celette et al., 2010). Son paramétrage dans le bassin versant du Rieutort a fait l'objet d'une attention particulière.

1.1. Dynamique du couvert végétal et état de surface des sols

Le principal point d'amélioration concerne la dynamique estivale de l'enherbement. Les formalismes de croissance de l'herbe intégrés dans le modèle WaLIS sont conservés. Ils sont basés sur la croissance, et la sénescence, de l'indice foliaire de l'herbe (LAIh) en fonction d'une somme de degré-jours (Celette et al., 2010). Cependant, nous intégrons une nouvelle intervention technique - le travail du sol - qui permet de détruire l'herbe sur une surface donnée (ex. rang, inter-rang, 1 inter-rang sur deux, etc.), c'est-à-dire de réduire le LAIh, tout en reprenant la croissance de l'herbe le jour suivant l'intervention. Auparavant, les variables de description du compartiment « herbe », comme la proportion de surfaces enherbées (pjherbe) et la taille du compartiment du sol auquel l'herbe a accès (TTSWh) étaient fixes. Désormais, elles évoluent de manière proportionnelle à la dynamique du LAIh (Figure 1). Le pjherbe devient l'équivalent d'un taux de couverture qui évolue avec le temps. Les interventions techniques peuvent être déclenchées à partir d'une date fixe ou d'un seuil de LAIh. Les deux limites que l'on observe encore à ce stade sont : (i) la non prise en compte de la phase de germination des graines après un travail de sol, qui

requierrait davantage de données sur l'humidité du sol et l'intensité des pluies (Pare, 2011), et (ii) la non prise en compte de la destruction de l'enherbement par désherbage chimique, couramment pratiquée sous le rang de vigne. Un désherbage chimique sera considéré comme équivalent à un travail du sol, ce qui peut poser problème pour l'estimation du paramètre d'infiltrabilité du sol (*curve number* CN) et le calcul du ruissellement.

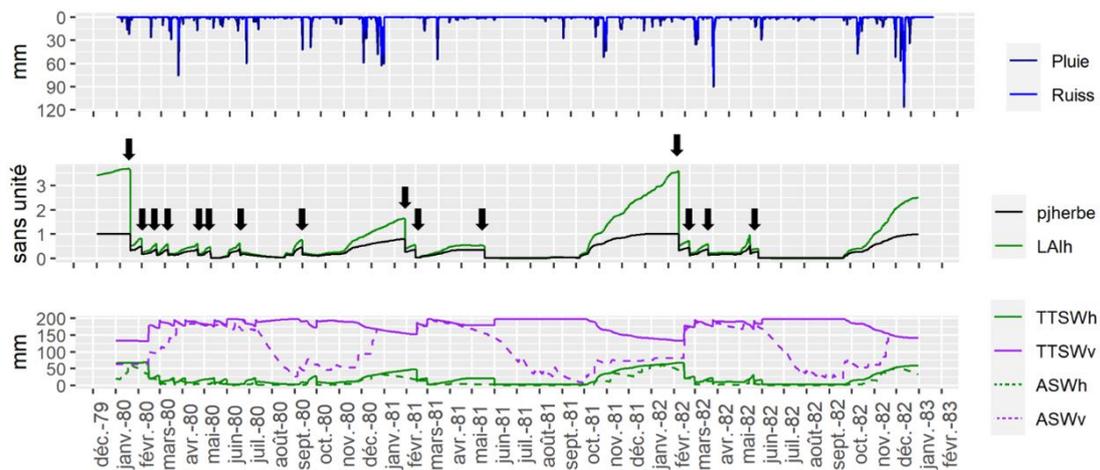


Figure 1 – Illustration de la dynamique de l'enherbement en fonction des travaux du sol (flèches noires) selon trois années climatiques (issues des données Aladin-drias). Ruiss : ruissellement, pjherbe : proportion de surface du sol enherbé, LAIh : indice foliaire de l'herbe, TTSW : dimension du réservoir d'eau accessible pour la vigne (v) et l'herbe (h). ASW : eau disponible pour la vigne (v) et l'herbe (h).

L'amélioration de la représentation de la dynamique de l'enherbement dans WaLIS a permis d'affiner la prise en compte de l'évolution des états de surface du sol pour le calcul du ruissellement. Le ruissellement est calculé par WaLIS avec la méthode du *curve number* (CN) (Boughton, 1989). Les différents paramètres du CN sont fournis par l'USDA (1993) en fonction du groupe hydrologique du sol (déterminé à dire d'experts pour les sols du Rieutort), de l'occupation du sol (ex. cultures pérennes enherbées, forêts, prairies), de la pluviométrie des cinq derniers jours et de deux états de surface du sol pour les parcelles de vigne exclusivement (enherbé et sol nu). Avec l'introduction des travaux du sol dans WaLIS, le CN varie désormais selon quatre états de surface du sol (travaillé, légèrement croûté, croûté, enherbé) (Romero et al., 2007). L'état de surface du sol est déterminé, à pas de temps journalier, par la croissance de l'herbe et le cumul pluviométrique depuis le dernier travail du sol (Andrieux et al., 2015) (Figure 2).

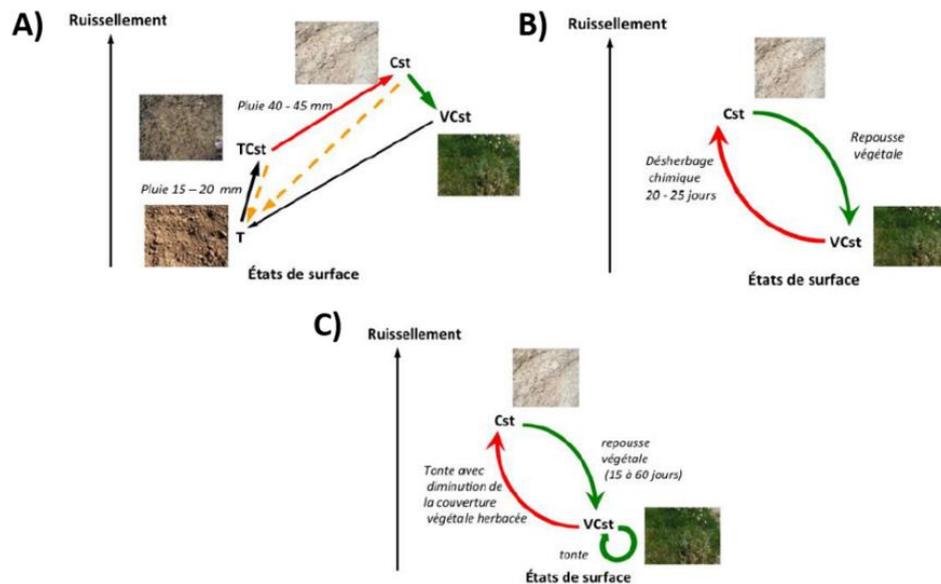


Figure 2 – Trajectoires d'évolution des états de surface du sol A) sur sols travaillés, B) sur sols dés herbés chimiquement, C) sur sols enherbés. T : fraîchement travaillé, TCst : légèrement croûté, Cst : croûté, VCst : enherbé à plus de 50% (tiré de Andrieux et al., 2015). Seuls les cas A et C ont pu être implémentés dans le modèle.

1.2. Vérification des modifications avec un jeu de données indépendant

Pour vérifier les améliorations faites sur le modèle WaLIS, nous disposons de données issues d'une expérimentation menée à Puisserguier (15 km au sud du Rieutort) par l'UMR LISAH (Andrieux et al., 2007), dont l'un des objectifs était de préciser l'impact des pratiques d'entretien des sols sur le ruissellement et l'infiltration. Les données concernant les itinéraires techniques, les événements pluvieux et les ruissellements associés sont disponibles pour quatre années consécutives (2002-2005) et selon quatre modalités d'entretien des sols :

- désherbage chimique total (D) ;
- enherbement spontané maîtrisé par désherbage chimique (G) ;
- enherbement spontané régulé par un travail du sol superficiel avec un cultivateur à dents semi-rigides de type ACTISOL (TA) ;
- enherbement semé (40% de ray-grass et 60% de fétuque rouge) de tous les inter-rangs (E).

Les paramètres de WaLIS sont ceux ayant servi à la validation du modèle sur cette même expérimentation et sont disponibles dans le manuel d'utilisateur de WaLIS, exceptés les paramètres CN, issus de USDA (1993) et de Romero et al. (2007) (Tableau 1).

Tableau 1 – Curve number utilisé pour les sols de Puisserguier. T : fraîchement travaillé, TCst : légèrement croûté, Cst : croûté, VCst : enherbé à plus de 50%

Groupe hydrologique	Occupation du sol	Etats de surface	Curve number
B	Vignes	Cst	86
B	Vignes	T	72
B	Vignes	Tcst	81
B	Vignes	Vst	83

L'intégration de la dynamique estivale de l'herbe et de l'évolution des états de surface du sol au modèle WaLIS permet de prendre en compte les différentes modalités d'entretien du sol, tout en améliorant la qualité des simulations du ruissellement (Figure 3). La modalité « désherbée » demeure la moins bien simulée du fait de la non prise en compte de l'effet du désherbage chimique, et donc d'une mauvaise estimation du CN.

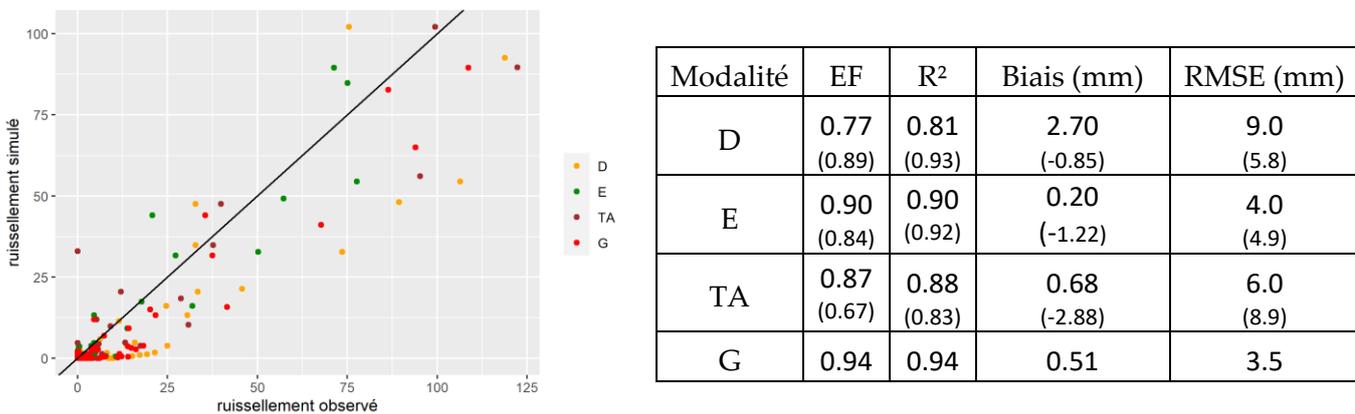


Figure 3 – Comparaison des ruissellements observés et simulés sur le site de Puisserguier pour les quatre modalités d'entretien du sol (D : désherbage chimique, E : enherbement semé, TA : enherbement maîtrisé par travail du sol G : enherbement maîtrisé par glyphosate). Les indicateurs de qualité du modèle sont l'efficacité du modèle (EF), le coefficient de détermination (R²), le biais et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (Janssen and Heuberger, 1995). Entre parenthèse, les performances du modèle WaLIS dans sa version V2.3, avant modification.

1.3. Calibration du modèle pour le bassin du Rieutort

La quantité maximale d'eau accessible à la vigne dans le sol est appelée TTSW (Total Transpirable Soil Water). Ce réservoir est borné par la profondeur d'enracinement, l'humidité maximale que peut contenir le sol (capacité au champ) et l'humidité minimale à laquelle la plante parvient à prélever l'eau du sol (lorsque la conductance stomatique $g_s = 0$). Son volume tient également compte de la capacité du système racinaire à accéder à cette ressource dans les différents horizons de sol. La TTSW peut être estimée à partir de profils hydriques mesurés en conditions extrêmes

de sécheresse et d'humidité du sol. En l'absence de ces mesures, nous pouvons approcher la TTSW par le réservoir utile (réservoir d'eau « physique » du sol délimité par la capacité au champ et le point de flétrissement), ou bien l'estimer en inversant le modèle de bilan hydrique.

La carte des réservoirs utiles présentée en atelier 2 pour caractériser la situation de référence n'a pas fait consensus. Nous avons donc cherché à estimer la réserve utile par d'autres moyens. Le réservoir utile peut être estimé en utilisant des équations de pédotransfert à partir d'observations de fosses pédologiques, ou bien par la mesure du $\delta^{13}\text{C}$ dans les moûts (Coulouma et al., 2020). La TTSW peut être estimée via le potentiel de base par inversion du modèle WaLIS (Pellegrino et al., 2006) ou en fonction de la pente de décroissance du potentiel de base (Gaudin et al., 2017). Ces quatre méthodes correspondent à des mesures locales, parfois difficiles à reproduire (ex. potentiel de base). Nous utilisons le réseau de 10 parcelles expérimentales, présenté dans le chapitre 3, représentant les six types de sols du bassin versant, pour réaliser ces quatre estimations. Les valeurs de TTSW de ces parcelles seront extrapolées à l'ensemble des parcelles correspondant aux mêmes types de sol dans le bassin.

Les estimations de la TTSW sont très variables selon les méthodes utilisées (Tableau 2). Nous excluons les estimations obtenues à partir de la méthode de Gaudin et al. (2017) du fait d'un événement pluvieux entre la mesure de deux potentiels de base, alors que cette méthode doit être mise en œuvre pendant une période sèche. Les estimations par fonction de pédotransfert ont été obtenues à partir des profils de sols décrits dans la notice de la carte pédologique au 1:100 000 (Bonfils, 1993) qui peuvent être assez différents des sols observés sur les parcelles suivies. Face aux divergences d'estimation, nous choisissons de nous tenir à une seule méthode. Entre le $\delta^{13}\text{C}$ et l'inversion de modèle, nous choisissons la méthode pour laquelle les estimations de rendement du modèle GraY sont les meilleures (chapitre 4). Les valeurs de TTSW pour chaque type de sol sont donc estimées par la méthode d'inversion du modèle WaLIS.

Tableau 2 – Estimation des TTSW (total transpirable soil water) pour les six types de sols du bassin versant, selon quatre méthodes d'estimation. N : nombre de parcelles suivies pour chaque type de sol.

Type de sol	N	Méthode d'estimation de la TTSW			
		Fonction de pédotransfert	Delta ¹³ C (Coulouma et al., 2020)	Décroissance du potentiel de base (Gaudin et al., 2017)	Inversion du modèle WaLIS (Pellegrino et al., 2006)
Alluvial	1	200-300	350	300	300
Fersiallitique	2	100-150	140	200-220	250
Argilo-calcaire profond	2	100-150	250-290	300-550	200-280
Argilo-calcaire superficiel	2	50-100	130-150	250-350	160-180
Schiste profond	2	60-100	60-70	130-150	150-200
Schiste superficiel	1	40-60	95	180	120

Références

- Andrieux, P., Coulouma, G., Zante, P., 2007. Impact de techniques culturales sur le ruissellement, l'érosion et la structure des sols viticoles 41.
- Andrieux, Patrick, Biarnès, A., Andrieux, P., Biarnès, A., Barbier, J.M., Bonnefoy, A., Compagnone, C., Delpuech, X., Gary, C., Metay, A., 2015. SP3A: spatialisation de pratiques agricoles adaptées et acceptables, Préservation des sols viticoles méditerranéens et amélioration de leurs fonctions de régulation des flux d'eau et de matières associées. Andrieux P. et Biarnès A. (Coord.). Rapport final GESSOL (MEDDE-ADDEME).
- Bonfils, P., 1993. Carte pédologique de France à moyenne échelle : Lodève L-22 : notice explicative, carte 1/100 000, Carte pédologique de France. INRA, Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, Olivet.
- Boughton, W., 1989. A review of the USDA SCS curve number method. *Soil Res.* 27, 511. <https://doi.org/10.1071/SR9890511>
- Celette, F., Ripoche, A., Gary, C., 2010. WaLIS—A simple model to simulate water partitioning in a crop association: The example of an intercropped vineyard. *Agricultural Water Management* 97, 1749–1759. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.008>
- Coulouma, G., Prevot, L., Lagacherie, P., 2020. Carbon isotope discrimination as a surrogate for soil available water capacity in rainfed areas: A study in the Languedoc vineyard plain. *Geoderma* 362, 114121. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114121>
- Delpuech, X., Metay, A., 2018. Adapting cover crop soil coverage to soil depth to limit competition for water in a Mediterranean vineyard. *European Journal of Agronomy* 97, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.013>
- Gaudin, R., Kansou, K., Payan, J.-C., Pellegrino, A., Gary, C., 2014. A water stress index based on water balance modelling for discrimination of grapevine quality and yield. *OENO One* 48, 1. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.1.1655>
- Gaudin, R., Roux, S., Tisseyre, B., 2017. Linking the transpirable soil water content of a vineyard to predawn leaf water potential measurements. *Agricultural Water Management* 182, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.006>
- 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>

- Janssen, P.H.M., Heuberger, P.S.C., 1995. Calibration of process-oriented models. *Ecological Modelling* 83, 55–66. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00084-9](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00084-9)
- Pare, N., 2011. Pollution de l'eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. Construction d'un modèle couplé pression-impact pour l'expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l'échelle de petits bassins versants.
- Pellegrino, A., Goze, E., Lebon, E., Wery, J., 2006. A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *Eur. J. Agron.* 25, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.03.003>
- Romero, P., Castro, G., Gómez, J.A., Fereres, E., 2007. Curve Number Values for Olive Orchards under Different Soil Management. *Soil Science Society of America Journal* 71, 1758. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0034>
- USDA, 1993. National Engineering Handbook, title 210–VI. Part 630, chapters 9. Washington, DC.

Annexe D

Bilan de la campagne de mesures 2020

Bilan du suivi des contraintes hydriques et des rendements viticoles en 2020 dans le bassin du Rieutort

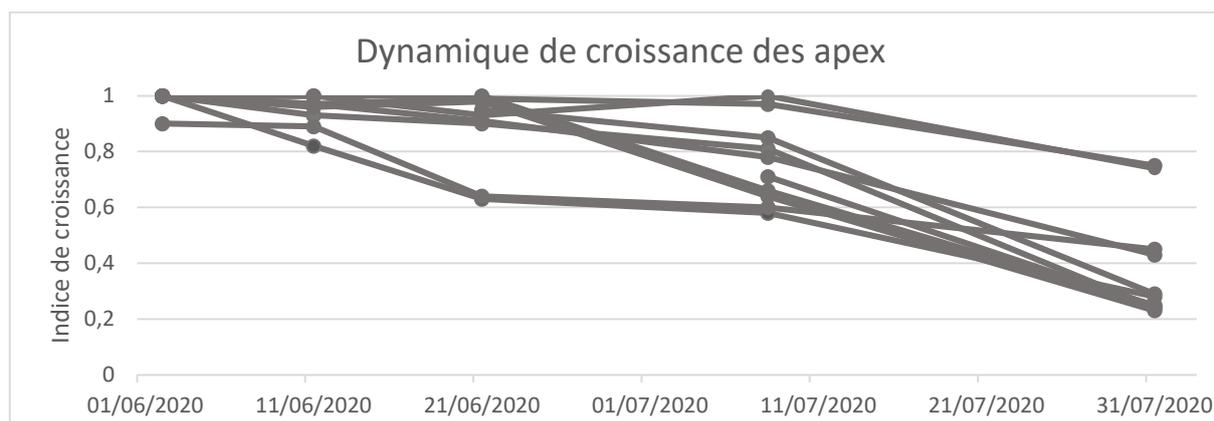
Ce document présente les résultats des mesures effectuées d'avril à septembre 2020 sur 10 parcelles contrastées du bassin versant du Rieutort (communes de Murviel les Béziers, Causses et Veyran, St Nazaire de Ladarez et Cabrerolles). Nous avons suivi au total 30 ceps sur chaque parcelle. Nous y avons répété les mêmes mesures : indicateurs de stress hydrique, rendements et composantes du rendement. Vous trouverez dans ce document la gamme des valeurs mesurées pour l'ensemble de ces 10 parcelles.

➤ Stress hydrique

Indicateur de croissance des apex

La méthode des apex est une méthode simple pour caractériser la croissance végétative de la vigne, qui est un indicateur de la contrainte hydrique. Elle est basée sur l'observation de l'extrémité des rameaux, que l'on appelle les apex. Elle permet, grâce à l'observation de 50 apex de compter les apex en pleine croissance, en croissance ralentie et en arrêt de croissance. On en déduit un indice de croissance végétative allant de 1 (tous les apex sont en croissance) à 0 (arrêt de croissance de tous les apex). L'arrêt de croissance est directement lié à la contrainte hydrique.

Vous pouvez voir sur le graphique que nous distinguons 3 types de parcelles. Deux parcelles plutôt situées au sud du bassin ne présentent aucun signe de ralentissement de croissance avant le mi-juillet suivi d'un ralentissement léger. Deux autres parcelles ont montré un ralentissement précoce (avant mi-juin) mais nous faisons l'hypothèse que ce ralentissement a été plutôt dû aux attaques de mildiou. Enfin, les 6 autres parcelles montrent un ralentissement début juillet. Ce ralentissement conduit à un quasi arrêt de croissance à la fin juillet.

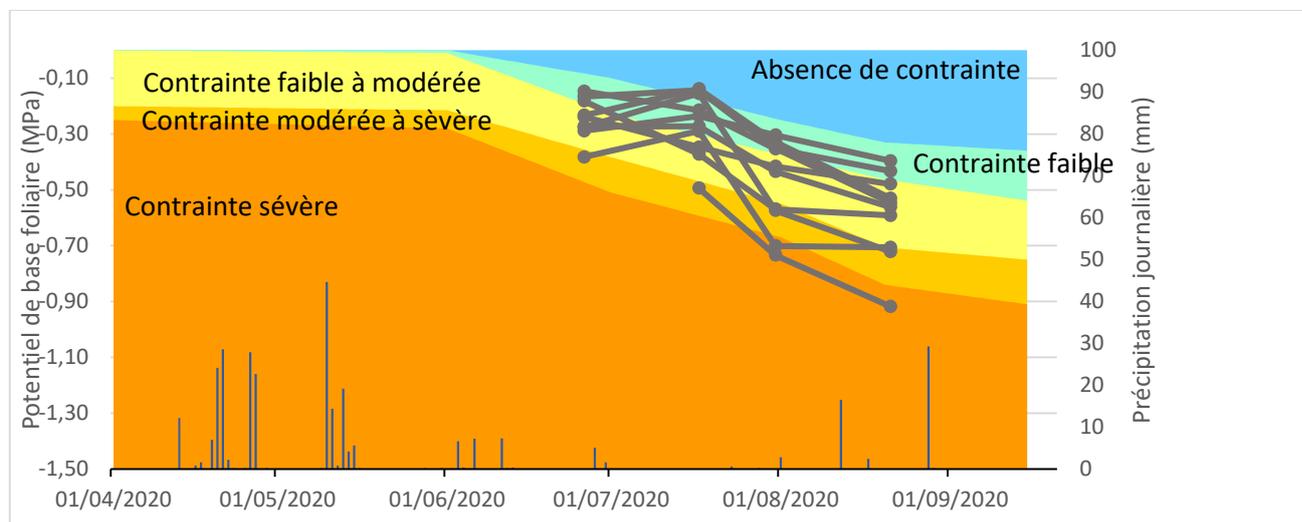


Potentiel de base

Il s'agit de la mesure de référence pour mesurer l'état hydrique de la vigne. Elle se réalise à l'aide d'une chambre à pression, qui permet de mesurer la capacité des cellules à retenir l'eau : plus la contrainte hydrique subie par la vigne est importante, plus la pression à appliquer sera importante. Il s'agit d'un indicateur robuste qui a permis d'obtenir de solides seuils de référence de l'état hydrique de la vigne. Vous pouvez voir sur le graphique ci-après que ces valeurs permettent de situer les parcelles en cinq

niveaux de contraintes hydriques, depuis aucune contrainte (en bleu), jusqu'à une contrainte sévère (en orange).

Nous observons un réel gradient de trajectoire hydrique dans le bassin, allant de parcelle n'ayant subi qu'une faible contrainte tout au long du cycle, jusqu'à des parcelles ayant subi une contrainte modérée voire sévère début août.



Delta ¹³C

Il s'agit d'une méthode basée sur l'analyse du rapport isotopique ¹²C/¹³C dans les sucres du moût à maturité. Il constitue un indicateur global de la contrainte hydrique subie par la vigne au cours de la période de maturation. Comme vous pouvez le voir dans le tableau ci-dessous, des valeurs plus élevées correspondent à des contraintes hydriques plus sévères.

Valeur	Niveau de contrainte
< -26	Absence de contrainte
-24,5 à -26	Contrainte faible
-23 à -24,5	Contrainte modérée
-21,5 à -23	Contrainte forte
< -21,5	Contrainte sévère

Gamme de mesures sur les 10 parcelles du Rieutort suivies en 2020 : entre -28,1 (absence de contrainte) et -23,1 (contrainte modérée)

Nous observons globalement la même diversité que pour le potentiel de base.

➤ Vendanges

Rendement au cep et ses composantes

Vous trouvez ci-après la gamme des valeurs moyennes du rendement et de ses composantes mesurées sur 30 ceps par parcelle. Il est à noter que les faibles rendements au cep sont majoritairement associés à un faible nombre de grappe.

	Rendement moyen (kg/cep)	Nombre moyen de grappes par cep	Nombre moyen de baies par grappe	Poids moyen d'une baie (g)
Gamme sur le Rieutort	1,03 à 7,78	9 à 23	84 à 202	1,12 à 1,87

➤ Synthèse

Nous avons réussi à capter une forte gamme de variation de la contrainte hydrique et des rendements grâce à l'échantillon de parcelles choisi. Nous arrivons à expliquer globalement les plus faibles rendements par les plus fortes contraintes hydriques. Seule une parcelle, conduite en gobelet, maintient de forts rendements malgré une contrainte mesurée importante. Ce suivi nous permet d'améliorer nos modèles de bilan hydrique dans le contexte du bassin versant du Rieutort. Il faut rappeler que l'année 2020 n'a pas été sèche avec environ 300 mm de pluie entre avril et septembre. Nous avons alors observé que la majorité des parcelles suivies a atteint un niveau de production correspondant à ses objectifs.

➤ Quelques références supplémentaires :

Comment mesurer la contrainte hydrique (IFV) ? <https://www.vignevin.com/publications/fiches-pratiques/lestimation-de-letat-hydrique-de-la-vigne/>

Une application pour utiliser vous-même la méthode des apex : <https://www.agrotic.org/les-actualites/apex-vigne-une-application-mobile-gratuite-pour-faciliter-le-suivi-de-la-croissance-des-vignes-et-estimer-la-contrainte-hydrique/>

Contact : Audrey Naulleau – audrey.naulleau@inrae.fr

Annexe E

Fiche de présentation des résultats du modèle à l'échelle de la parcelle

3b- Parcelle enherbée en IGP sur terrasses argilo-calcaires profondes

Description du sol : Sols argilo-calcaires, moyennement profonds (1m-1m50), situés sur les terrasses les plus basses. Réserve utile comprise entre 100 et 150 mm.

Production et objectifs de rendement : Production en IGP avec un objectif de rendement à 90 hl/ha (12 t/ha) ou supérieur.

Cépage : Syrah **Densité :** 4 500 pieds / ha

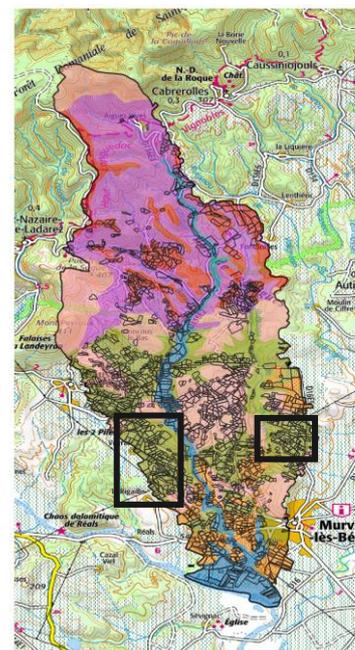
Rapport feuille/fruit : Quantité de feuillage élevée (1,20 m) pour charge en bourgeons moyenne (12 bourgeons par cep)

Irrigation : Non

Entretien du sol : Maintien d'un enherbement spontanée 1 rang sur 2

Au cours de la saison entre 4-5 labours en moyenne sont effectués selon la hauteur de l'herbe sur les inter-rangs non enherbés, dont :

- Un premier travail du sol en sortie d'hiver (15 fev)
- Un dernier travail du sol après vendanges (01 oct)

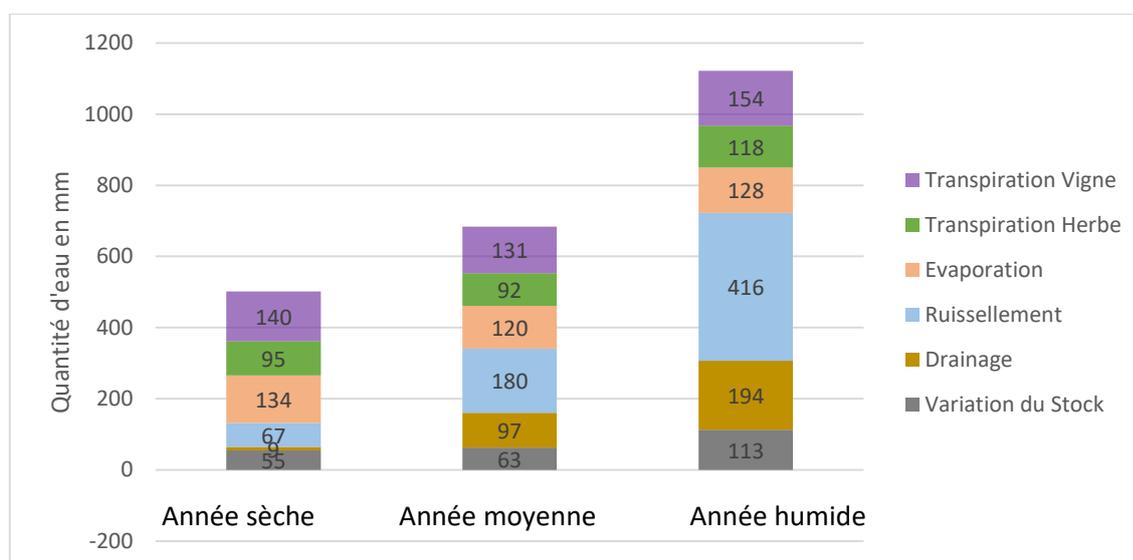


En année humide 5 passages sont nécessaires pour contrôler l'herbe, seulement 2 en année sèche.

Deux tontes (01-mars et 01-mai) permettent de contrôler l'herbe dans les inter-rangs enherbés.

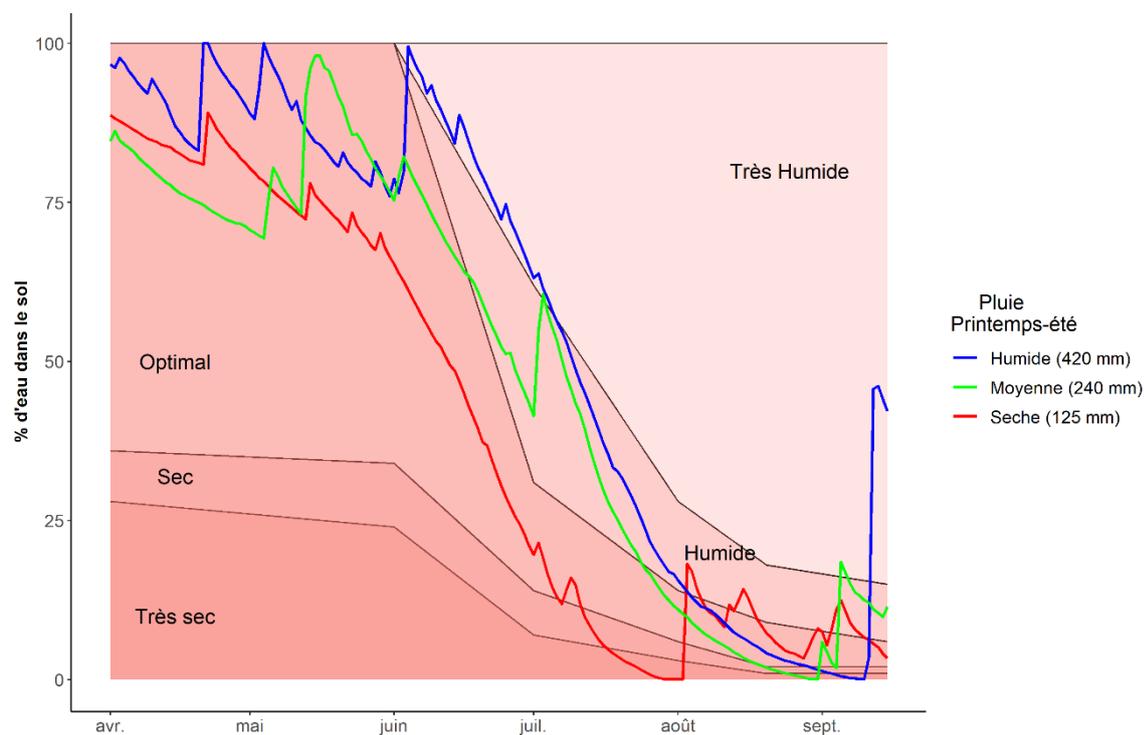
Le rang est désherbé chimiquement ou mécaniquement une première fois (01 mars) et avec une reprise (01 juin).

Termes du bilan hydrique en mm



Le présence d'un enherbement 1 rang sur 2 l'été permet de limiter l'évaporation du sol. L'effet sur le ruissellement est limité du fait de la prédominance des pluies en hiver. Il y a peu de concurrence avec la vigne.

Parcours hydrique de la parcelle



La présence de l'enherbement affecte peu le parcours hydrique de la parcelle en année moyenne et humide. Par contre, en année sèche, il provoque une contrainte plus sévère dès juillet.

Rendement

En moyenne, le rendement potentiel est de 135 hl/ha, soit 18t/ha. Le rendement objectif des 90 hl/ha est atteint 2 années sur 3.

Annexe F

Présentation des scénarios climatiques

1. Les scénarios climatiques

Les cinq scénarios climatiques (histo, RCP4.5_2050, RCP4.5_2100, RCP8.5_2050, RCP8.5_2100) qui ont été construits correspondent à des périodes de 30 ans. Pour simplifier l'écriture, l'horizon 2050 correspond à la période 2031-2060, l'horizon 2100 à la période 2071-2100. Les évolutions climatiques sont exprimées par rapport à la période historique (1981-2010). Je présente ci-après les évolutions d'indicateurs climatiques clés sur la période 1950-2100. Les moyennes sur les 30 années associées à chacun des scénarios climatiques sont repérées par des traits horizontaux (Figure 4, 5, 6, 8).

1.1. Une élévation marquée des températures

A l'horizon 2050, les températures moyennes augmenteront de +1,6 à + 1,8°C selon les scénarios climatiques (Figure 1). A l'horizon 2100, l'élévation de températures se poursuivra pour atteindre +2,2 en RCP 4.5 et +4°C en RCP 8.5. Le nombre de jours où les températures maximales dépasseront les 35°C passent de 5 jours par an en moyenne en période historique de 15 à 21 jours à l'horizon 2050 et de 26 à 54 jours à l'horizon 2100. Ces températures sont défavorables à la bonne maturité des baies et accroissent le risque d'échaudage des baies (Crespy, 1992).

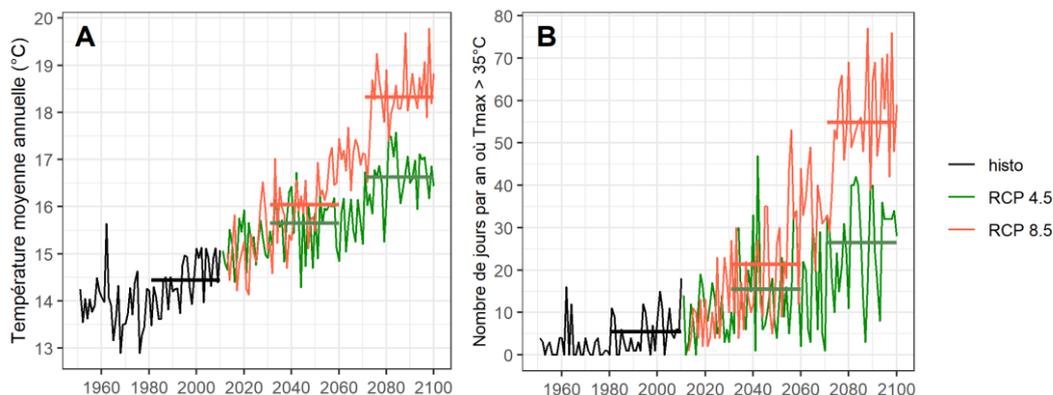


Figure 1 –Evolution des températures dans la zone centrale du bassin versant du Rieutort sur la période 1950-2100 (données Aladin-Drias). Les traits horizontaux représentent les moyennes des variables climatiques pour la période historique et pour les deux scénarios climatiques à moyen et long termes.

Des indices agro-climatiques permettent de caractériser le climat viticole à partir des températures sur l'ensemble du cycle de la vigne (indice de Huglin) ou pendant la phase de maturation des baies (indice de nuits fraîches) (équations et références dans le Tableau 1.2). La valeur de ces deux indices permet de classer les climats (Tonietto and Carbonneau, 2004). Dans le bassin versant du Rieutort, le climat en période historique est en moyenne « tempéré chaud » avec des nuits « tempérées » (Figure 2). A l'horizon 2050, le climat deviendra « chaud » pour les deux scénarios RCP 4.5 et 8.5. Ce type de climat correspond à l'actuel Sud de l'Espagne (Tonietto and Carbonneau, 2004). A l'horizon 2100, pour le RCP 8.5, le climat sera en moyenne « très chaud » avec des nuits « chaudes ». Ce climat correspond aux températures actuellement observées en Colombie, Brésil et Tunisie (Tonietto and Carbonneau, 2004).

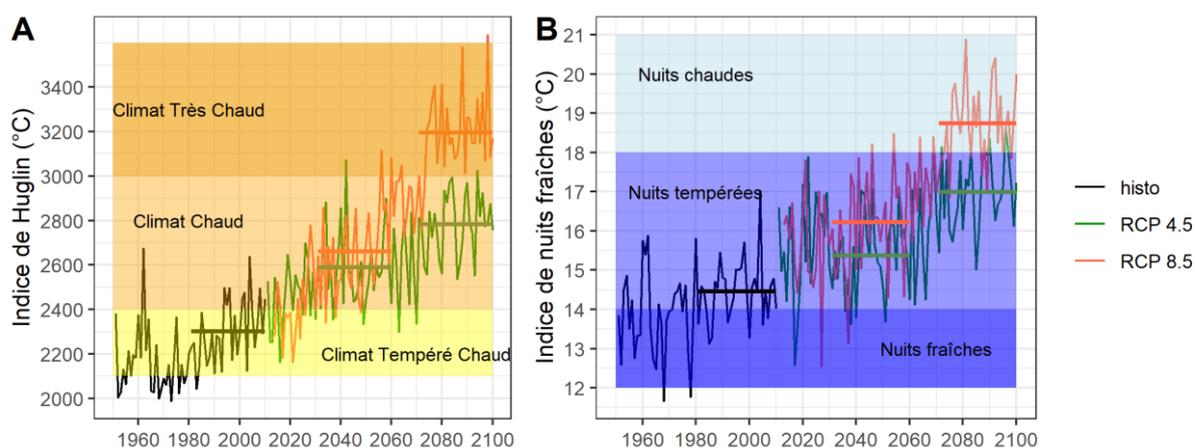


Figure 2 – Indice de Huglin et de nuits fraîches dans la zone centrale du bassin versant du Rieutort sur la période 1950-2100 et pour les trois périodes de 30 ans (données Aladin-Drias). Les catégories de climat sont celles définies par par Tonietto et Carbonneau (2004). Les traits horizontaux représentent les moyennes des variables climatiques pour la période historique et pour les deux scénarios climatiques à moyen et long termes.

1.2. Un régime pluviométrique modifié

Le cumul annuel de pluviométrie tendra vers une diminution de l'ordre de 1 à 11 % à l'horizon 2050 et de 2 à 16 % à l'horizon 2100 selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (Figure 3A). Malgré une stabilité de la pluviométrie moyenne en RCP 4.5, on note une augmentation du nombre d'années très sèches (< 400 mm) et très humides (> 1000 mm) (Figure 3B). En RCP 8.5, plus de la moitié des années seront sèches (400-700mm) à très sèches (< 400 mm) dès l'horizon 2050. On note donc une variabilité interannuelle plus importante dans les scénarios climatiques futurs.

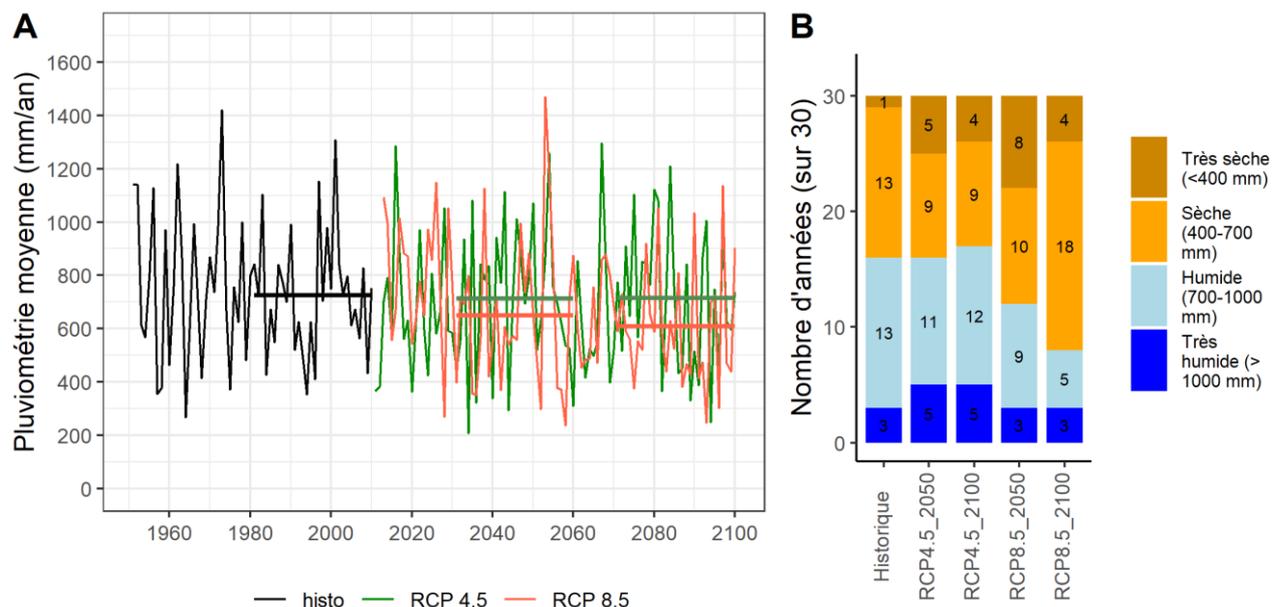


Figure 3 : Evolution de la pluviométrie annuelle dans la zone centrale du bassin versant du Rieutort (A) sur la période 1950-2100 (données Aladin-Drias), (B) par types d'années selon les cinq scénarios climatiques. Les traits horizontaux représentent les moyennes des variables climatiques pour la période historique et pour les deux scénarios climatiques à moyen et long termes.

Le régime pluviométrique a aussi été caractérisé à l'échelle saisonnière (Figure 4). Pour les cinq scénarios climatiques, on note une augmentation de la variabilité des pluies en automne et en hiver. Cette variabilité rend difficile l'identification d'une tendance à la baisse ou à la hausse des pluies hivernales. Les pluies diminueront au printemps et tendront à augmenter légèrement en été.

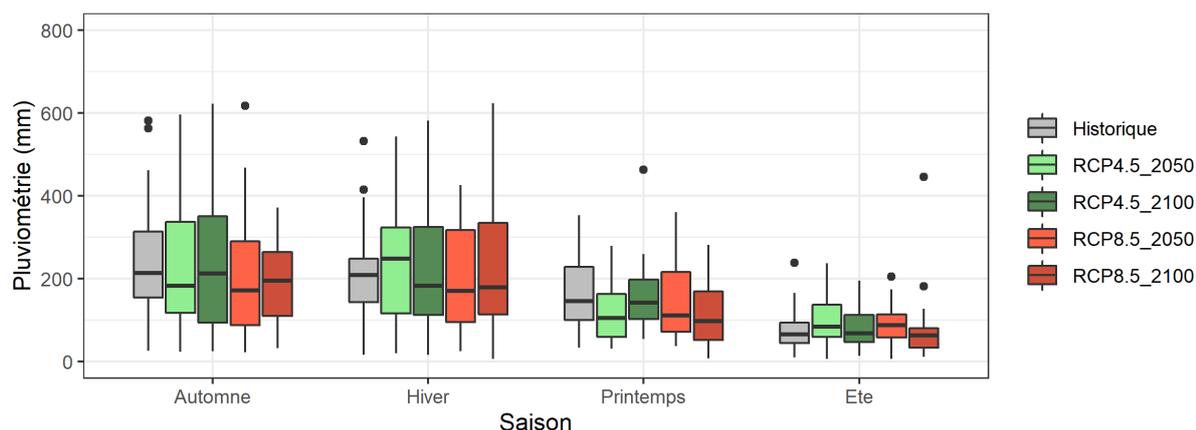


Figure 4 – Cumul de pluie saisonnier selon les deux RCP (4.5 et 8.5) et les deux périodes d'études : horizon 2050 (2031-2060) et horizon 2100 (1971-2100) (données Aladin-Drias). Chaque boxplot représente 30 années.

1.3. Evolution du bilan hydrique de la vigne

L'indice de sécheresse de Tonietto and Carbonneau (2004) est un bilan hydrique simplifié à l'échelle mensuelle. Si le bilan est positif, la disponibilité en eau est supérieure aux besoins de la vigne, sous l'hypothèse que la réserve utile du sol (supposée de 200 mm) soit remplie au début du cycle (hypothèse forte). Il permet de prendre en compte l'augmentation de la demande évaporative liée à l'augmentation des températures. L'équation est donnée dans le Tableau 1.2. Dans la zone centrale du bassin versant du Rieutort, l'indice de sécheresse est en moyenne positif (125 mm) pendant la période historique avec 4 années sur 30 négatives (Figure 5). Dans le scénario RCP 4.5, l'indice reste en moyenne supérieur à 100 mm aux horizons 2050 et 2100. Dans le scénario RCP 8.5, il diminue pour atteindre 82 mm à l'horizon 2050, puis 8 mm à l'horizon 2100. Dans ce dernier cas, plus d'une année sur deux est déficitaire.

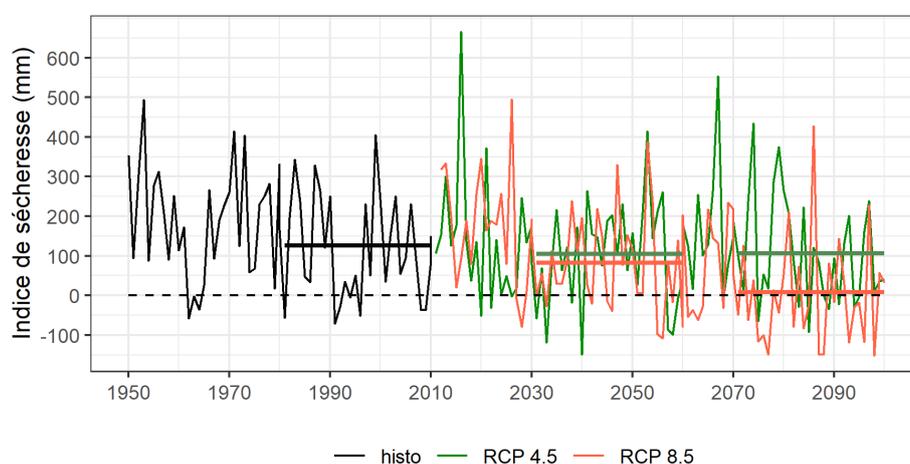


Figure 5 : Evolution de l'indice de sécheresse dans la zone centrale du bassin versant du Rieutort sur la période 1950-2100 (données Aladin-Drias) (Tonietto et Carbonneau, 2004). Les traits horizontaux représentent les moyennes de l'indice pour la période historique et pour les deux scénarios climatiques à moyen et long termes.

Références :

- Crespy, A., 1992. Viticulture d'aujourd'hui. 2ème édition., Lavoisier. ed.
- Tonietto, J., Carbonneau, A., 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.06.001>

2. Résumé du débiaisage CDFt

	RR (mm/an)	TN (°C)	TX (°C)	TM (°C)	UM (%)	V10 (m/s)	RG (J/cm ²)	ET0 (mm/an)	
Nord maille 4080	837	10.1	15.9	13.0	74	3.1	1280	861	avant débiaisage
	759	9.1	18.6	13.4	70	2.9	1461	973	après débiaisage
	-78	-1.0	2.7	0.4	-4	-0.2	181	112	différence
Centre maille 3937	783	10.9	17.3	14.1	73	3.4	1281	917	avant débiaisage
	710	10.0	19.9	14.5	69	3.2	1462	1039	après débiaisage
	-73	-0.9	2.6	0.4	-4	-0.2	181	122	différence
	707	9.9	19.9	14.5	69	3.2	1462*	1008*	observée (Murviel ou Roujan*)
Sud maille 3794	610	11.1	17.9	14.5	72	3.3	1275	934	avant débiaisage
	544	10.2	20.6	14.9	67	3.1	1455	1054	après débiaisage
	-66	-0.9	2.7	0.4	-5	-0.2	180	120	différence

Tableau 1 – Variables climatiques avant et après débiaisage pour les trois mailles SAFRAN du bassin du Rieutort, pour la période 1990-2005. RR : pluviosité annuelle, TN : température minimale journalière, TX : température maximale journalière, TM : température moyenne journalière, UM : humidité moyenne journalière, V10 : vitesse moyenne du vent à 10 m (m/s), RG : rayonnement global journalier, ET0 : évapotranspiration de référence annuelle. Les données en bleu correspondent aux données observées à Murviel (ou Roujan pour le RG). ET0 calculé selon Penman-Monteith - FAO-56, à partir des composantes débiaisées (TN, TX, UM, V10, RG)

Annexe G

Matériel supplémentaire du Chapitre 4

Appendix A - Simulated and observed data within the Rieutort watershed

Table A.1: Characteristics of the 10 experimental plots. PDO: protected designation of origin. PGI: protected geographic indication. spontCC: spontaneous cover crop during winter. ¼: one inter-row in four kept covered during summer. Sectors correspond to production sector in Figure 4.6.

Plot	Soil type	Production	Yield objective (hl/ha)	Irrigation	Cover crop management	Variety	Sector	Altitude (m)
1	alluvial	PGI	90	No	spontCC_winter	Syrah	1	27
2	fersiallitic	PGI	90	Yes	spontCC_winter_summer 1/4	Syrah	2	37
3	fersiallitic	PDO	40-45	No	spontCC_winter	Grenache	3	44
4	Clay limestone	PDO	45	No	spontCC_winter	Grenache	5	131
5	Clay limestone	PGI	50-55	No	spontCC_winter	Syrah	4	139
6	Superficial clay limestone	PDO	40	No	spontCC_winter_summer 1/4	Syrah	6	125
7	Superficial clay limestone	PDO	35	No	spontCC_winter	Syrah	6	130
8	Shale	PDO	55-60	No	spontCC_winter	Grenache	7	148
9	Superficial shale	PDO	30-35	No	spontCC_winter	Syrah	8	165
10	Shale	PDO	50	No	spontCC_winter	Syrah	7	237

Table A.2: Climatic projection data for the north and south areas of the Rieutort watershed

	1981-2010	2031-2060		2071-2100	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
<i>North area</i>					
Annual precipitation (mm)	749	743	674	754	648
Growing season precipitation (mm)	235	245	236	267	213
Annual mean temperature (°C)	13.3	14.5	14.9	15.5	17.2
Growing season mean temperature (°C)	18.1	19.6	19.9	20.5	22.7
Annual cumulated ET ₀ (mm)	923	989	1007	1027	1111
<i>South area</i>					
Annual precipitation (mm)	555	561	532	550	522
Growing season precipitation (mm)	203	213	198	227	187
Annual mean temperature(°C)	14.8	16.0	16.5	17.0	18.7
Growing season mean temperature (°C)	19.7	21.1	21.5	22.1	24.2
Annual cumulated ET ₀ (mm)	1002	1080	1100	1128	1214

Table A.3: Parameters of the simulations performed with the WaLIS model for the 10 experimental fields. Parameters with an asterisk correspond to new parameters introduced in WaLIS to better represent the cover crop dynamics along the year. Explanations are given below the table.

Input parameters	Simulations										
	Un.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
System description											
$p^{cc_{min}}$ *	-	0	0.16	0	0	0	0.16	0	0	0	0
Minimal proportion of soil covered by cover crop											
$p^{cc_{max}}$ *	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Maximal proportion of soil covered by cover crop											
TTSW	mm	300	250	250	180	280	160	180	200	120	170
Total Transpirable Soil Water											
$TTSW_{max}^{cc}$ *	mm	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Maximal Total Transpirable Soil Water for the cover crop											
Initial conditions											
ASW_v^0	mm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Initial available Soil water for the grapevine											
ASW_{cc}^0	mm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Initial available soil water for the cover crop											
p_0	-	0	0.16	0	0	0	0.16	0	0	0	0
Initial proportion of soil covered by cover crop											

Input parameters		Simulations										
		Un.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Acronym and description												
Soil evaporation												
b1	Soil evaporation parameter	-	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
b2	Soil evaporation parameter	-	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
U	Soil surface water capacity	mm	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Run-off												
s ₁ ^r ,s ₂ ^r	Threshold parameters (under the row)	-	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28	12.7, 28
s ₁ ^{ir} ,s ₂ ^{ir}	Threshold parameters (in the inter-row)	-	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53	35.6,53
CN _{ir} ,CN _r	"Curve number" parameter (inter-row, row)	-	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83	86, 83
Vineyard processes												
d _{bud}	Budburst date	dd/m	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19	07/04/19
		m/yy	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20	30/03/20
dd _{lmax}	Degree-days to get maximum crop coefficient	°Cd	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600

Input parameters		Simulations													
		U _n	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10			
Acronym and description		dd/m	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11	01/11
d_{transp}	End of transpiration date	m													
K_{max}	Maximum crop coefficient	-	0.62	0.64	0.52	0.41	0.58	0.51	0.56	0.50	0.47	0.49			
WI_v	Water stress parameter on transpiration	-	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4		
Cover crop processes															
LAI_0	Initial LAI	m ² .m ⁻²	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
LAI_{rate}	LAI growth rate parameter	-	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
LLS_{min}	Degree-days of the green leaf life period	°Cd	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540	540
WI_{cc}^1	Water stress parameter on LAI growth	-	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
WI_{cc}^2	Water stress parameter on transpiration	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
NNI	Nitrogen nutrition index	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ϵ	Coefficient of extinction	-	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$k_{\epsilon_{max}}$	Maximum crop coefficient	-	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95

Input parameters		Simulations										
Acronym and description		Un.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Cover crop management												
d_{cut}	Dates of cover crop cuts	dd/m m/yy		31/03/19				28/02/19		18/03/19		
				24/03/20				31/05/19		19/03/20		
								09/05/20				
d_{till}^{IR*}	Dates of tillage in the inter-rows	dd/m m/yy	15/02/19	15/10/18	10/03/19	15/02/19	25/03/19	28/02/19	21/05/19	19/04/19	26/10/18	15/03/19
			30/03/19	31/03/19	15/05/19	03/05/19	01/06/19	30/04/19	20/03/20	23/05/19	30/03/19	15/04/19
			30/04/19	15/11/19	10/03/20	06/02/20	23/06/19	31/05/19	06/05/20	17/07/19	30/05/19	15/05/19
			30/05/19	24/03/20	15/05/20	04/05/20	12/03/20	21/02/20		10/05/20	01/07/19	18/03/20
			30/06/19	15/06/20			24/03/20	10/04/20		26/06/20	18/03/20	12/04/20
			15/08/19				01/07/20	20/05/20		07/07/20	03/05/20	14/06/20
			10/10/19									
			15/02/20									
			31/03/20									
			28/04/20									
			30/05/20									
			30/06/20									

Input parameters		Simulations									
Acronym and description	Un.	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
d_{till}^{R*}	dd/m m/yy	15/03/19	31/03/19	12/03/19	03/05/19	12/03/19	26/02/19	22/03/19	20/03/19	31/03/19	28/02/19
		10/06/19	15/06/19	15/03/20	28/05/20	12/03/20	26/02/20	21/05/19	17/07/19	03/04/20	28/02/20
		14/03/20	23/03/20					20/06/19	14/03/20		
								17/03/20	30/06/20		
Irrigation management											
dose	Water provided in one irrigation supply	mm									
		25									
d_{irri}	Dates of irrigation supply	dd/m m/yy									
		13/07/19									
		18/08/19									
		20/07/20									
		05/08/20									
		20/08/20									

* The size of the soil compartment explored by the root system of the cover crop (TTSW_{cc}) is a variable state that evolves with time between 0 and a maximum value ($\text{TTSW}_{\text{max}^{cc}}$) in proportion to the cover growth (LAI calculated in WaLUS). The cover crop can be destroyed by tillage of the soil. Two types of operations are taken into account: under the row (d_{till}^R) and in the inter-row (d_{till}^{IR}). The tillage reduces the proportion of soil covered by the cover crop (p), the size of the soil compartment to which its root system has access (TTSWh) and its leaf area (LAI).

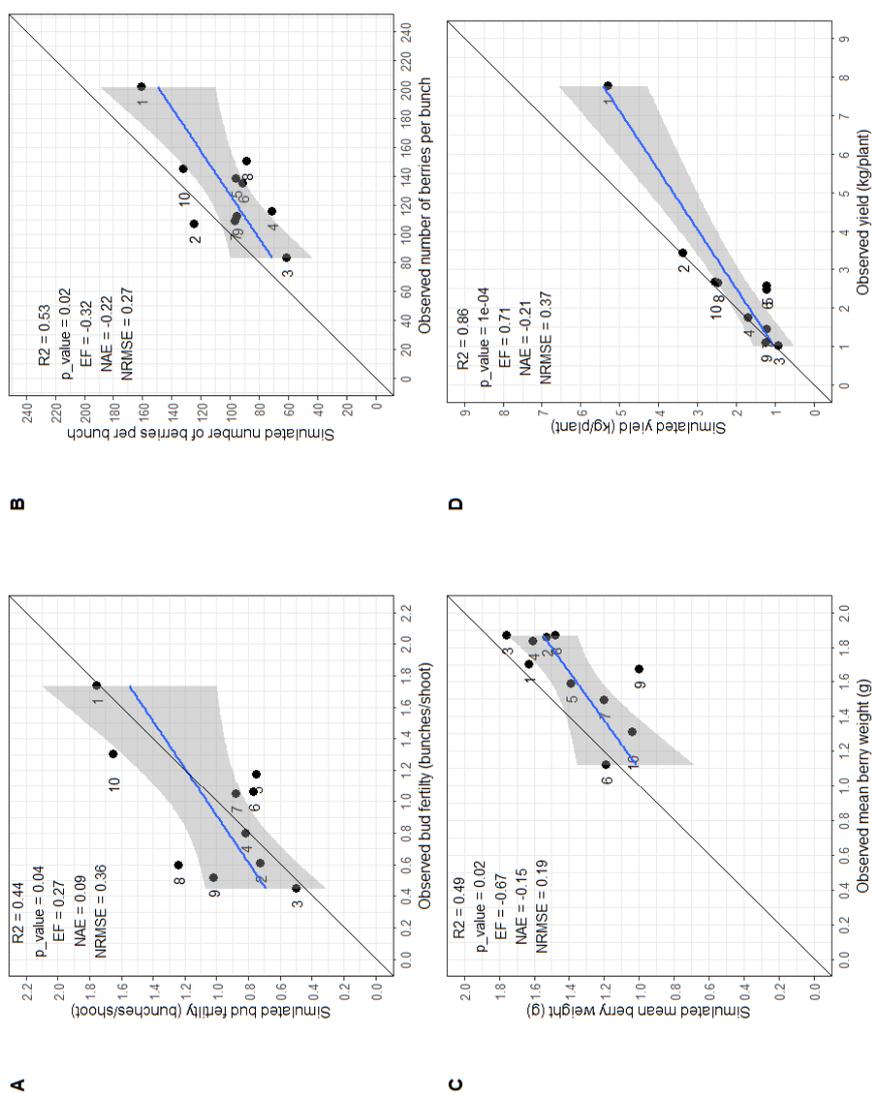


Figure A.1: GraY model evaluation in the 10 experimental plots: (A) Bud fertility, (B) number of berries per bunch, (C) berry weight, (D) yield. R2: coefficient of determination. EF: model efficiency, NAE: Normalized average error, NRMSE: Normalized root mean square error

Appendix B - Calibration of the GraY model

Table B.1: Description of experimental dataset for GraY model calibration. *fBud*: bud fertility. *nBerry*: number of berries per bunch. *wBerry*: average berry weight.

Department	Vineyard	Variety	Years	Numbers of elements	Yield	fBud	nBerry	wBerry	Sources
Vaucluse	Gadagne	Syrah	2001-2003	3	X	X	X	X	Gaudin et al., 2014
	Saint Cécile	Syrah	2002-2003	4	X			X	Gaudin et al., 2014
Bouches-du-Rhone	Lancon de Provence	Syrah	2002-2003	2	X		X	X	Gaudin et al., 2014
Gard	Aspères	Syrah	2000-2003	8	X	X	X	X	Gaudin et al., 2014
Hérault	Sauteyrargues	Syrah	1998-2003	5	X		X	X	Gaudin et al., 2014
	Villeneuve	Syrah	2010-2012	9	X	X	X	X	Guilpart et al., 2014

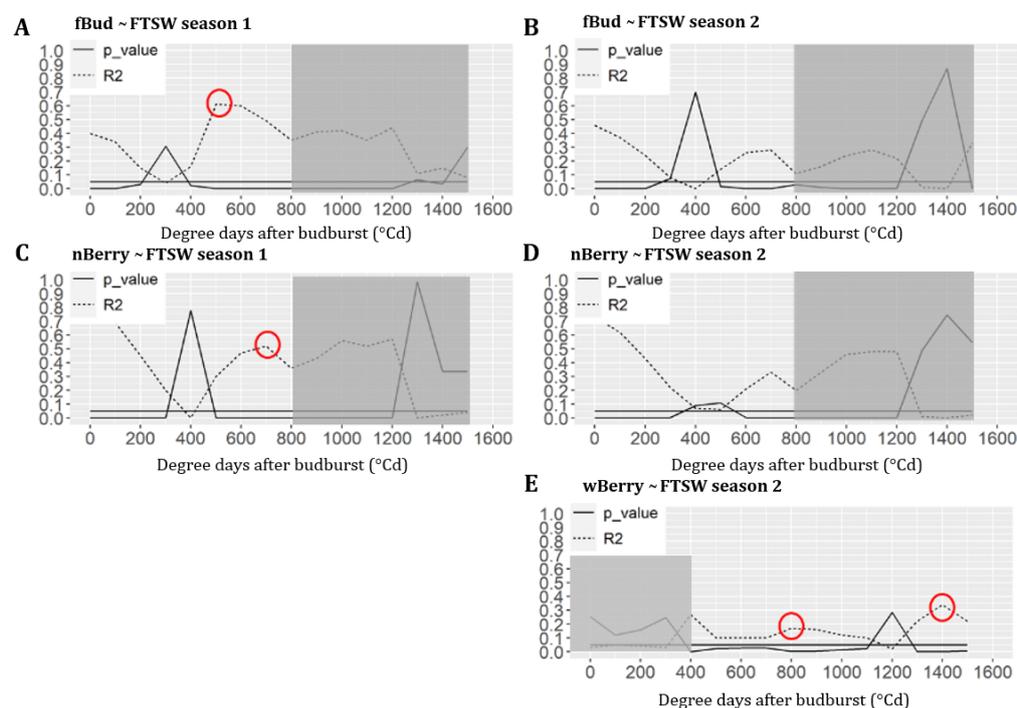


Figure B.1: Identification of critical periods of sensitivity of bud fertility (A, B), number of berries per bunch (C, D) and berry weight (E) to water deficit (FTSW) in season 1 (A, C) and season 2 (B, D, E). The time periods lasted 100°Cd and were calculated from budburst. R² and p-value are those corresponding to linear regressions of yield components at harvest of season 2 on mean FTSW (simulated with the WaLIS model) over each time period. Red circles indicate the identified critical periods. Grey areas indicate the periods when yield components are not influenced by water deficit due to physiological reasons: during bud dormancy (800°Cd) in season 1; after fruit set (800 °Cd) in season 2 for bunch and berry numbers and before flowering (400 °Cd) for berry weight. FTSW: Fraction of Transpirable Soil Water.

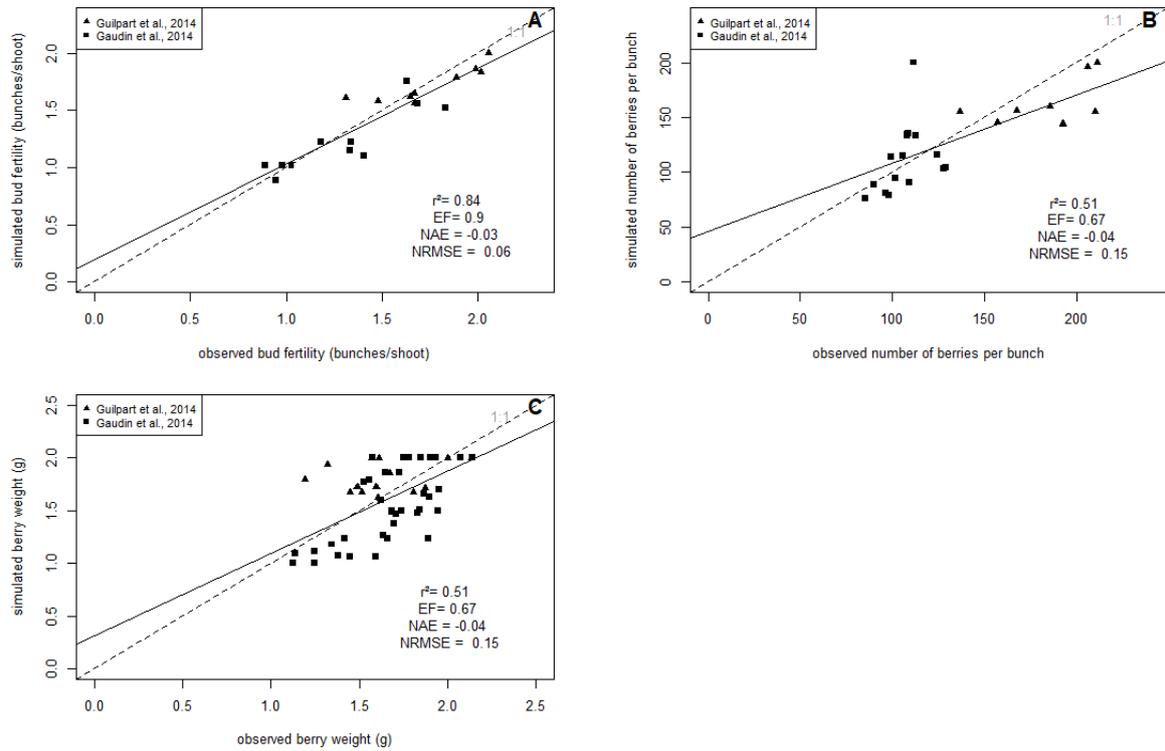


Figure B.2: Observed and simulated yield components with the calibrated GraY model: A) bud fertility, B) berry number, C) berry weight. r^2 : coefficient of determination. EF: model efficiency, NAE: Normalized average error. NRMSE: Normalized root mean square error.

Annexe H

Matériel supplémentaire de l'article
présenté en Chapitre 5

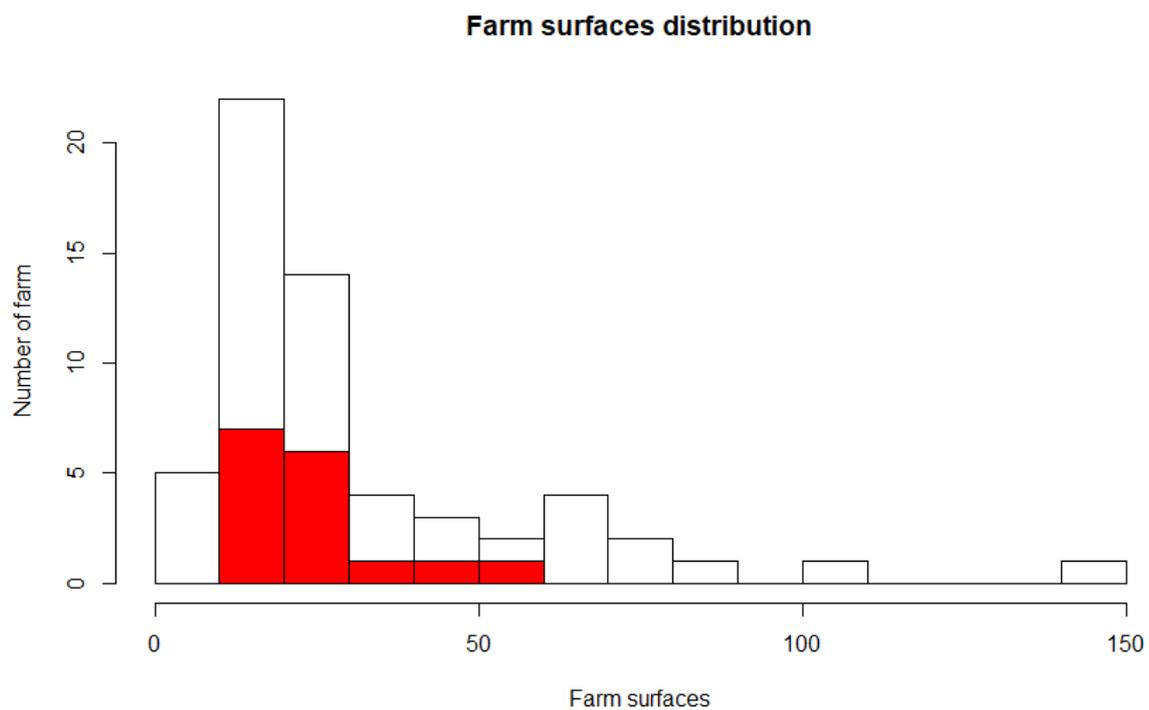
Supplementary material

Supplementary table 1 – Description of the eight production sectors of the Riuetort watershed

Production sector	Vineyard surface (ha)	Soil type	Production type	Variety (%)			Irrigated ?
				Early	Mid	Late	
1	100	Alluvial	PGI	31	36	33	Yes
2	77	Fersiallitic	PGI	30	32	38	Yes
3	108	Fersiallitic	PGI	17	48	36	No
4	399	Limestone	PGI	20	46	34	No
5	173	Limestone	PDO	0	87	13	No
6	278	Superficial limestone	PDO	0	87	13	No
7	205	Shale	PDO	0	79	21	No
8	84	Superficial shale	PDO	0	82	18	No

Supplementary table 2 – Chilling (C*) and forcing (F*) parameters, used as thresholds above which a given phenological stage from dormancy to budbreak (C* BB and F* BB), from budbreak to flowering (F* BB-FL) and from flowering to veraison (F* FL-VER) is reached. The units are in number of days for all parameters (Morales-Castilla et al., 2020).

	Early –ripening variety	Mid-ripening variety	Late-ripening variety	Late-ripening composite
C* BB	99.319	71.529	104.034	127.53
F* BB	15.868	20.339	18.246	21.06
F* BB-FL	15.87	17.406	17.121	20.94
F* FL-VER	59.164	57.309	61.027	64.12



Supp Fig. 1: Farm surfaces distribution. In red the 18 farms which have 85% of their surfaces in the watershed. In white: the farms that have at least one plot in the watershed (source: RPG 2017)

RÉSUMÉ

Co-construction et évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique d'un vignoble méditerranéen

La viticulture méditerranéenne est un emblème culturel et économique particulièrement menacé par le changement climatique : avancée du cycle phénologique, baisse des rendements et de la qualité de la récolte. Pour limiter ces impacts négatifs, il est essentiel de mobiliser dès maintenant plusieurs leviers d'adaptation comme les cépages tolérants à la sécheresse, l'ombrage, l'irrigation, etc. Cependant, les communautés scientifique et professionnelle peinent à fournir des préconisations claires sur les stratégies à mettre en œuvre pour articuler ces leviers à une échelle locale.

Cette thèse vise à explorer l'hypothèse selon laquelle la combinaison de leviers techniques, ainsi que leur distribution dans le paysage, donnent des marges de manœuvre pour adapter la viticulture au changement climatique. Elle contribue à construire et évaluer quantitativement des stratégies d'adaptation qui combinent plusieurs leviers techniques au sein d'un bassin versant viticole (45 km²). Elle propose une démarche originale de modélisation participative, composée d'une série d'ateliers collectifs entrecoupés de phases de modélisation. Les principaux résultats de cette thèse sont triples. Premièrement, la mobilisation précoce des acteurs dans la démarche a permis de développer un modèle original dont les composantes répondent aux attentes des participants. Ce modèle *ad hoc* intègre des modèles existants (phénologie, bilan hydrique, ruissellement) et originaux (modèle de rendement GraY), aux échelles de la parcelle et du bassin versant. Deuxièmement, la construction collective des stratégies d'adaptation a favorisé la prise en compte de plusieurs facteurs spatiaux (type de sol, climat, type de production, accès à l'irrigation) pour construire des stratégies pertinentes au sein d'un territoire. Ces stratégies visent à retarder les dates de vendanges, améliorer l'efficacité de l'eau et relocaliser le vignoble. Troisièmement, la simulation de ces stratégies sous conditions climatiques futures a montré la capacité de certains secteurs à réduire les pertes de rendement liées au changement climatique en mobilisant plusieurs leviers innovants. Les échanges réguliers avec les acteurs ont enrichi l'évaluation par le modèle, en y ajoutant des aspects économiques (ratio coût/bénéfice), techniques (faisabilité) et sociaux (souhaitabilité).

L'approche originale proposée dans cette thèse a permis de rapprocher les acteurs de la filière viticole des travaux issus de la modélisation. Cette approche ouvre ainsi des perspectives pour orienter les travaux de modélisation futurs vers des outils plus adaptés aux attentes d'une filière ou d'un territoire. Elle encourage également la combinaison d'outils de simulation quantitatifs avec des approches participatives pour répondre aux enjeux, entre autres climatiques, du XXI^{ème} siècle.

Mots clefs : changement climatique, gestion de l'eau, modélisation participative, paysage, rendement, *Vitis vinifera*.

ABSTRACT

Co-construction and evaluation of adaptation strategies to climate change in a Mediterranean vineyard

Mediterranean viticulture is a cultural and economic emblem that is particularly threatened by climate change: advancing phenological cycle, decreasing yields and harvest quality. In order to limit these negative impacts, it is essential to mobilize several adaptation levers now, such as drought-tolerant grape varieties, shading, irrigation, etc. However, the scientific and professional communities are struggling to provide clear recommendations on the way strategies need to be implemented to articulate these levers at a local scale.

This thesis aims to explore the hypothesis of which the combination of technical levers, as well as their distribution in the landscape, gives leeway to adapt viticulture to climate change. It contributes to the design and quantitative evaluation of adaptation strategies that combine several technical levers within a wine-growing watershed (45 km²). It proposes an original participatory modeling approach, composed of a series of collective workshops interspersed with modeling phases. The main results of this thesis are threefold. Firstly, the early mobilization of stakeholders in the process allowed the development of an original model whose components meet the expectations of the participants. This *ad hoc* model integrates existing models (phenology, water balance, runoff) and original models (GraY yield model), at the plot and watershed scales. Secondly, the collective design of adaptation strategies has favoured the consideration of several spatial factors (soil type, climate, type of production, access to irrigation) for building relevant strategies within a territory. These strategies aim at delaying harvest dates, improving water efficiency and relocating the vineyard. Thirdly, the simulation of these strategies under future climatic conditions showed the capacity of certain sectors to reduce yield losses due to climate change by mobilizing several innovative levers. Regular exchanges with stakeholders enriched the model's evaluation by adding economic (cost/benefit ratio), technical (feasibility) and social (desirability) aspects.

The original approach proposed in this thesis allowed bringing together process-based model's results and the grapevine sector stakeholders. As a consequence, these works opens new perspectives for orienting future modeling works towards tools, better adapted to professional sector expectations in a territory. It also encourages the combination of quantitative simulation tools with participatory approaches in order to meet the challenges of the 21st century, including climate change.

Keywords: climate change, yield, participatory modeling, landscape, water management, *Vitis vinifera*.