



Évaluer numériquement les impacts du changement climatique au sein d'un bassin viticole pour co-construire des stratégies d'adaptation

Audrey Naulleau¹, Laurent Prévot², Christian Gary¹, Laure Hossard³

¹ ABSys, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Ciheam-IAMM, Montpellier, France

² LISAH, Univ Montpellier, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier, France

³ Innovation, Univ Montpellier, INRAE, CIRAD, Institut Agro, Montpellier, France

Contact auteurs : audrey.naulleau@inrae.fr <https://doi.org/10.54800/rtr361>

Résumé

Les enjeux du changement climatique sont souvent présentés à l'échelle globale, alors que l'adaptation nécessite des connaissances sur ses impacts à une échelle locale. Cet article propose une démarche originale combinant modélisation numérique et démarche participative au sein d'un bassin viticole méditerranéen. Elle a pour objectifs (i) d'utiliser les projections climatiques avec des acteurs, (ii) de quantifier les impacts du changement climatique selon les systèmes de production, et (iii) d'engager des réflexions sur les adaptations à mettre en œuvre.

Les résultats de simulation ont montré une vulnérabilité accrue des systèmes viticoles à haut rendement, comparés aux systèmes en AOP. Cependant, des incertitudes subsistent concernant l'occurrence des événements extrêmes et l'effet de températures élevées. Les adaptations envisagées s'appuient sur ces résultats et sont enrichies des connaissances expertes.

Mots clés : sécheresse, viticulture, Méditerranée, modèle de simulation, démarche participative

Abstract Quantitative evaluation of climate change impacts in a wine-growing watershed to support the design of local adaptation strategies

Climate change issues are often presented at a global scale, whereas adaptation requires a knowledge on their impacts at a local scale. This article proposes an original approach that combines modelling and participatory approaches in a Mediterranean winegrowing watershed. Our objectives are to (i) use climate projections with stakeholders, (ii) quantify the impacts of climate change according to the different production systems, and (iii) initiate discussions on the adaptations to be implemented. Our methodological framework follows a three steps scheme: conceptualization, model testing, and model simulations of different climate scenarios. The originality lies in the involvement of local and regional stakeholders at each step of the study, with the aim to build a conceptual scheme, define a reference situation, and raise comments regarding the simulation results under future climatic conditions.

Our study led to the development of a simulation model that takes into account stakeholder's concerns. We highlight the increased vulnerability of high-yield winegrowing systems compared to premium quality wine systems. However, uncertainties remain concerning the occurrence of extreme events and the effect of high temperatures. The discussions on adaptations integrate these results, while going beyond the use of the model. Our study illustrates the interest of bringing modellers and stakeholders together to deal with climate change issues, even if this remains challenging.

Keywords: drought, grapevine, Mediterranean, simulation model, participatory design

Introduction

Les enjeux du changement climatique sont souvent présentés à l'échelle globale, alors que le succès de l'adaptation au changement climatique se trouve dans son intégration à la réalité locale de l'activité agricole (Réseau Action Climat, 2014). Meynard (2016) encourage les agronomes à revoir les modes de production de savoirs afin d'accompagner les systèmes sociotechniques au travers de tels enjeux globaux et complexes. Dans le cadre de cette étude, nous faisons l'hypothèse que l'évaluation des impacts agricoles du changement climatique doit inclure des acteurs porteurs de savoirs complémentaires, élargir les champs disciplinaires, et développer, adapter ou combiner de nouveaux outils pertinents aux problématiques locales. Notre étude a pour objectif d'explorer dans quelle mesure les connaissances issues de la modélisation dynamique d'un système viticole sous climat futur peuvent être associées à une démarche participative dans le but de produire une évaluation locale, spatialisée et quantitative des impacts du changement climatique.

Dans les décennies à venir, la viticulture méditerranéenne fera face à des augmentations de températures, des avancées des cycles de la vigne et des déficits hydriques, qui pourront avoir des impacts sur le rendement et la qualité de ses vins (Ollat et Touzard, 2014), mais aussi sur l'ensemble de l'écosystème (ressource en eau, biodiversité). L'évaluation quantitative de ces impacts est menée généralement par modélisation à l'échelle mondiale (Hannah *et al.*, 2013), continentale (Fraga *et al.*, 2016), ou régionale (Moriondo *et al.*, 2011). Ces échelles limitent la prise en compte de l'hétérogénéité des contextes pédo-climatiques et socio-économiques (van Leeuwen *et al.*, 2013), qui déterminent pourtant la vulnérabilité des viticulteurs au changement climatique (Nicholas et Durham, 2012). Des difficultés apparaissent alors pour communiquer les résultats de ces modèles à la profession viticole, car ils sont peu adaptés au contexte local (types de sol, appellations, réseaux d'irrigation, etc.).

D'autres études s'appuient sur des processus participatifs (ateliers ou enquêtes) pour prendre en compte les particularités du territoire dans la recherche d'adaptation au changement climatique (Barbeau *et al.*, 2015; Lereboullet *et al.*, 2013). Or nous constatons que ces études se contentent de lister différents leviers d'adaptations envisagés par les acteurs (irrigation, systèmes de conduite, cépage, etc.) sans aller jusqu'à en évaluer quantitativement les performances (Naulleau *et al.*, 2021). Sans quantification locale des impacts, partagée avec les acteurs, il est difficile d'identifier les stratégies les plus efficaces. C'est pourquoi notre étude utilise un modèle numérique pour proposer, en amont d'une réflexion sur les stratégies d'adaptation, une étude d'impacts du changement climatique basée sur des résultats de simulations qui font sens localement.

La démarche de modélisation participative

Cas d'étude et participation

Le bassin versant du Rieutort (45 km², 43.5° N, 3.1° E) est spécialisé dans la production viticole (80% de la SAU). La partie amont (coteaux) est dominée par un couvert arboré au sein duquel des parcelles de vignes sont cultivées sur des sols superficiels sur schistes, et dont le faible niveau de production est destiné à l'élaboration de vin en AOP. La partie centrale se trouve sur des sols argilo-calcaires, avec une production de vins AOP ou IGP selon des terroirs très hétérogènes. Le sud du bassin (plaine) est constitué de sols issus de dépôts alluviaux de l'Orb, parfois très profonds. La vigne, parfois irriguée, y est plus productive. Cette juxtaposition d'une viticulture de plaine à haut rendement et d'une viticulture de coteaux à forte valorisation est représentative des vignobles de l'arc Méditerranéen.

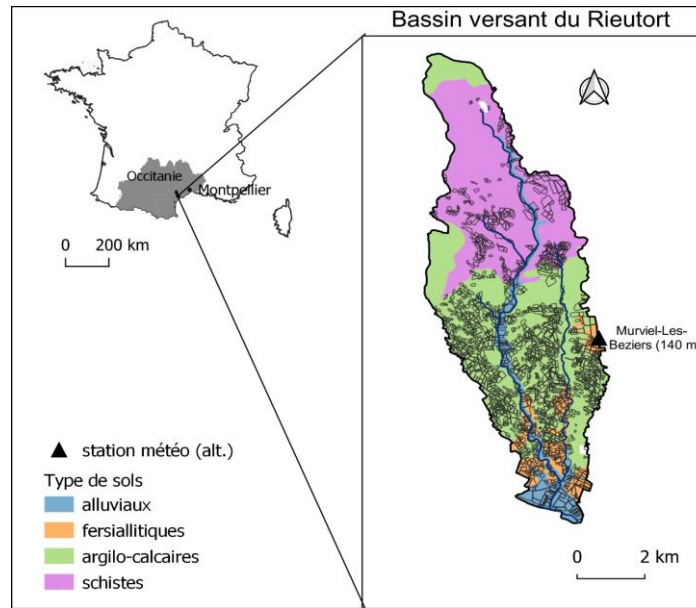


Figure 1 : Le bassin versant du Rieutort.

En trait bleu, le réseau hydrographique (BD carthage) ; en noir, les parcelles viticoles (RPG 2017) ; en couleur, les types de sols, issus de la carte pédologique de Lodève au 1:100 000 (Bonfils, 1993)

Le bassin versant du Rieutort est une unité spatiale qui se trouve à l'interface de plusieurs territoires. Pour initier la démarche participative, les acteurs locaux ont été interviewés individuellement pour leur présenter notre démarche, et les interroger sur les principales caractéristiques du bassin ainsi que sur leur perception du changement climatique. 13 acteurs locaux ont été rencontrés dont 8 viticulteurs, 2 représentants des syndicats d'AOP présents dans la zone, le président de la cave coopérative, et 2 représentants de l'unité de gestion du bassin versant de l'Orb. Puis, sept acteurs régionaux ont été rencontrés (dont l'agence de l'eau, la chambre d'agriculture départementale, le conseil départemental et l'institut français de la vigne et du vin) afin de resituer le bassin par rapport à une dynamique régionale. La plupart d'entre eux ont participé à la suite de la démarche collective.

Une succession d'ateliers et de phases de modélisation en trois étapes

Nous proposons un processus de modélisation en trois étapes (Voinov, 2008) - construction du modèle, test en situation de référence, et simulations de scénarios futurs - en y intégrant la participation des acteurs à chaque étape afin de construire, orienter et vérifier les choix faits en cours de processus (Figure 2).

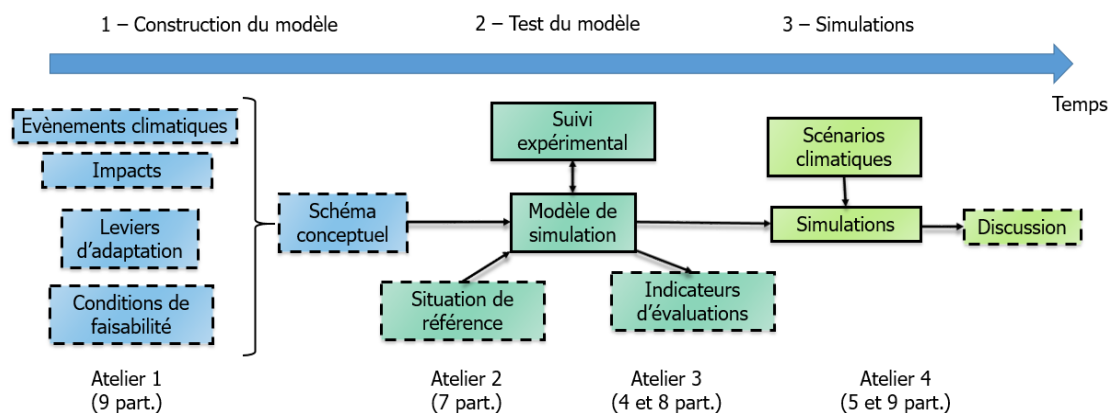


Figure 2 : Présentation de la démarche en trois étapes. Les activités menées avec les acteurs sont encadrées en pointillés, les activités menées par les chercheurs sont encadrées en lignes continues. Entre parenthèses, le nombre de participants (hors chercheurs) à chaque atelier. Les ateliers 3 et 4 se sont déroulés avec 2 groupes séparés (acteurs régionaux, puis locaux)

La construction du modèle consiste à choisir les processus à intégrer dans le modèle ainsi que leurs interactions. Les acteurs ont d’abord été invités à partager leurs points de vue sur leur représentation du système et du changement climatique au cours d’un premier atelier de conceptualisation. Puis le modélisateur a sélectionné, parmi les modèles existants, ceux permettant de transcrire les processus décrits en équations mathématiques, en se basant sur les données disponibles (ou facilement accessibles) dans le bassin versant. Trois modèles existants 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). Pour déterminer le rendement de la vigne, les modèles existants (comme STICS ou Cropsyst) sont apparus peu adaptés aux leviers techniques proposés par les acteurs et difficiles à paramétrer à l’échelle du bassin du Rieutort. De ce fait, nous avons développé un modèle inspiré de démarches existantes (Guilpart *et al.*, 2014; van Leeuwen *et al.*, 2019) qui estime le rendement à partir de la disponibilité en eau dans le sol calculée par WaLIS. Le modèle de simulation développé est composé de quatre modules (Figure 3) permettant de simuler les dynamiques spatiotemporelles (i) de l’eau (infiltration, évapotranspiration, ruissellement), et de (ii) la production viticole à l’échelle de la parcelle et du bassin versant à un pas de temps journalier.

Scénarios climatiques

RCP 4.5 – 8.5

Historique - futurs proche et lointain

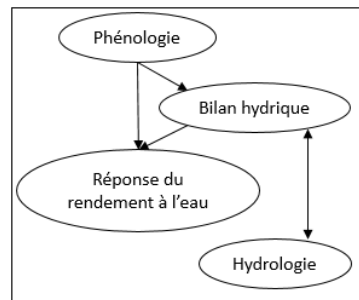
Pratiques

- Irrigation
- Cépages (phénologie)
- Dimension de la canopée
- Ombrage
- Densité de plantation
- Gestion de l’enherbement

Contexte local

- Type de sol
- Accès à l’irrigation
- Production AOP/IGP

Modèle spatialisé



Variables de sortie

- Stades phénologiques
- Besoins en irrigation
- Quantité d’eau ruisselée
- Rendement, etc.

Figure 3 : Présentation du modèle de simulation. A gauche, les entrées spatialisées du modèle, au centre, les quatre modules qui constituent le modèle et à droite les sorties calculées par le modèle

Le test du modèle consiste à vérifier la bonne représentation de la gestion de l’espace dans le modèle, c’est-à-dire des interactions entre les traits du milieu et les pratiques et performances des systèmes viticoles actuels (Boiffin *et al.*, 2014). La description de la situation de référence permet de renseigner les entrées du modèle ainsi que leur niveau de détail en fonction des données disponibles et des connaissances des acteurs. Cette activité a été menée via un atelier d’analyse spatiale participative à l’échelle du bassin versant. Un premier paramétrage « interne » du modèle a été réalisé par les chercheurs en conduisant un suivi expérimental sur des parcelles du bassin. Puis une vérification « à dire d’experts » a été réalisée en atelier, sur la base des simulations de la situation de référence pour la période 1981-2010 à l’échelle de la parcelle puis du bassin versant. La représentation des sorties du modèle à l’échelle du bassin versant (indicateurs d’évaluation) a été construite avec les acteurs.

Une fois la situation de référence évaluée comme fiable par les acteurs pour la période 1981-2010, cette même situation a été simulée sous scénarios climatiques futurs. Nous avons utilisé le modèle climatique régional CNRM-ALADIN, développé par Météo-France (<http://www.drias-climat.fr/>). Les résultats présentés dans cet article concernent le scénario d’évolution de la concentration en CO₂ dans l’atmosphère la plus élevée (correspondant à une élévation de 5°C des températures à la fin du siècle) appelé RCP 8.5 (GIEC, 2014). Deux horizons temporels sont étudiés : autour de 2050 (2031-2060) et 2100 (2070-2100).

Adéquation des outils de modélisation aux questionnements des acteurs

Atelier de conceptualisation (atelier 1)

La phase de conceptualisation en amont de la programmation numérique du modèle permet d'assurer une meilleure adéquation du modèle aux attentes des participants, ainsi qu'une meilleure compréhension et transparence des résultats de simulation. Nous avons utilisé des outils de *brainstorming* (en groupe ou en séance plénière) pour organiser les discussions selon les différentes parties du modèle :

- Entrées : événements climatiques attribués au changement climatique, leviers d'adaptation envisagés, contexte d'adoption des leviers ;
- Sorties : impacts du changement climatique dans le bassin versant ;
- Processus : ce qui lie les entrées aux sorties du modèle.

Les événements climatiques relevés par les acteurs sont à la fois localisés (ex : gel) et régionaux (ex : sécheresse). Les acteurs se sont montrés particulièrement préoccupés par la succession d'événements climatiques extrêmes (2017 : sécheresse, 2018 : pression de maladies liées au printemps pluvieux, 2019 : vague de chaleur). Ces perceptions ont été confrontées aux projections climatiques pour le secteur de Murviel-lès-Béziers (Tableau 1). Le scénario climatique RCP 8.5 prévoit une diminution des pluies annuelles de 8,5% à l'horizon 2050 et jusqu'à 12% à l'horizon 2100, qui s'accompagnera d'une hausse des températures moyennes de 1,6 et 3,9°C respectivement. L'évolution combinée de ces deux variables climatiques entraîne l'augmentation du déficit hydrique annuel, calculé selon l'indice de sécheresse de Tonietto and Carbonneau (2004). Cet indice représente la différence entre la disponibilité en eau (de pluie) et les besoins de la vigne (évapotranspiration). Cet indice tend à diminuer jusqu'à devenir négatif, ce qui indique une période en moyenne déficitaire en eau à l'horizon 2100. Cependant, nous avons noté que ces indicateurs moyens sur 30 ans n'ont pas convaincu les participants, comme déjà remarqué par Garin *et al.* (2015). En effet, certaines informations demandées par les acteurs sont trop localisées (ex : gel) ou bien trop incertaines (ex : événements extrêmes) pour être prédites par les modèles climatiques. Il est donc nécessaire de produire ou de transmettre différemment les informations existantes sur l'évolution du climat pour une meilleure adéquation avec les questionnements des acteurs.

Tableau 1 : Description des données issues des projections climatiques (scénario RCP 8.5) pour la station de Murviel-lès-Béziers (moyennes sur 30 ans)

	1981-2010	2031-2060	2071-2100
Cumul de pluie annuel	692 mm	633 mm	609 mm
Température annuelle moyenne	14,4°C	16°C	18,3°C
Nombre de jours où Tmax > 35°C	1 j/an	9 j/an	37 j/an
Indice de sécheresse	50 mm/an	5 mm/an	- 10 mm/an

Les acteurs perçoivent un certain nombre d'impacts négatifs liés au changement climatique. Ils sont à la fois agronomiques (baisse des rendements, augmentation de la mortalité), environnementaux (risque de crues, d'érosion, cours d'eau asséchés) et économiques (revenu du viticulteur, économie locale). Pour les contrer, ils envisagent plusieurs leviers d'adaptation. Certains leviers concernent le long terme (choix du matériel végétal, durée de la jachère, développement d'un réseau d'irrigation), d'autres consistent en des réponses annuelles à la variabilité du climat (hauteur d'écimage, enherbement, irrigation). Nous avons noté une forte imbrication des échelles spatiales. Par exemple, l'irrigation est un levier envisagé à l'échelle de la parcelle (mais sous condition qu'à l'échelle territoriale des réseaux d'irrigation soient développés et que les cahiers des

charges des appellations l'autorisent), et qu'à l'échelle de l'exploitation la décision soit prise d'investir dans ce matériel en fonction notamment de la stratégie commerciale et de la typicité des vins recherchée. La dernière partie de l'atelier a donc listé l'ensemble des caractéristiques du bassin (sols, pentes, types de production, tailles des exploitations, etc.) importantes à prendre en compte pour l'applicabilité des leviers d'adaptation dans le territoire.

Confrontation du schéma conceptuel avec le modèle développé

Parmi l'ensemble des éléments évoqués par les acteurs (Figure 4), le modèle développé permet de prendre en compte cinq leviers principaux : l'irrigation, les cépages (à travers leur phénologie), la gestion du rapport feuille/fruit, la densité de plantation, l'enherbement. Les données et modèles disponibles ne permettent de simuler qu'une partie des impacts du changement climatique (cf. les « post-it » non encadrés en noir sur la Figure 4). Pour certains d'entre eux, des indicateurs ont pu être trouvés pour apporter une information sur certains impacts (ex : la qualité de récolte via la température moyenne pendant la maturation des baies). Notre étude quantitative ne prend cependant pas en compte certains aspects relevés par les acteurs, soit par manque de connaissances sur les processus (tolérance à la sécheresse de différents cépages, effet des porte-greffes), soit par manque de données disponibles (fonctionnement des exploitations, microclimat).

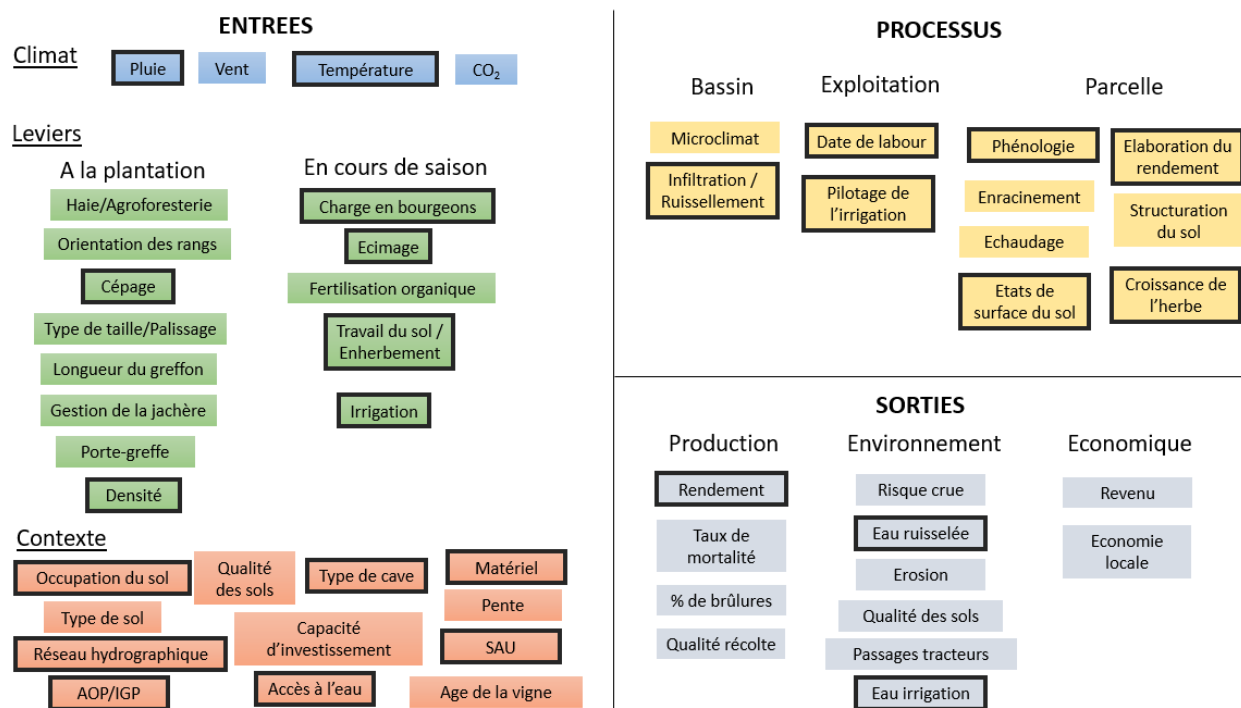


Figure 4 : Schéma conceptuel construit par les acteurs. Chaque encadré correspond à un « post-it ». Les éléments intégrés dans le modèle quantitatif sont encadrés en noir

La mobilisation des acteurs pour l'élaboration du schéma conceptuel a présenté plusieurs avantages. Elle a d'abord permis, dès le début du processus, d'aborder certains sujets sensibles (ex : l'irrigation) qui auraient pu dominer et donc limiter les discussions. Elle a également permis d'orienter le modélisateur dans ses choix et de les expliquer aux participants au moyen de ce schéma, rendant ainsi les limites du modèle plus transparentes.

Les résultats de simulation à l'épreuve du terrain

Analyse spatiale participative pour définir la situation de référence (atelier 2)

La situation de référence inclut les caractéristiques biophysiques et les pratiques culturelles présentes dans le bassin versant. L'enjeu de l'atelier 2 était de trouver un compromis entre la qualité et la quantité (niveau de précision) des données à mettre en entrée du modèle, au regard de leur disponibilité et de l'expertise mobilisable. Les cartes préexistantes mobilisées (carte pédologique au 1 : 100 000, Registre Parcellaire Graphique, orthophotographies, zones d'appellations de l'INAO, réseau d'irrigation) n'étant pas toujours adaptées à une interprétation à notre échelle de travail, les acteurs ont souhaité les modifier pour qu'elles correspondent mieux à leur connaissance du terrain. 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 la carte. Toutes les informations contenues dans les cartes travaillées avec les acteurs ont été résumées en 8 secteurs de production (Figure 5), chacun correspondant à une série unique d'entrées du modèle. De plus, le bassin a été divisé en trois zones climatiques : sud (secteurs 1 à 3), centre (secteurs 4 à 6) et nord (secteurs 7 et 8) pour prendre en compte le gradient climatique entre la plaine (plus sèche et aux températures plus élevées) et les reliefs au nord du bassin.

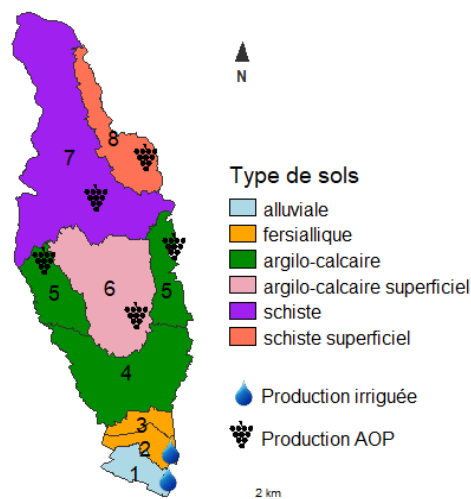


Figure 5 : Description de la situation de référence obtenue par analyse spatiale participative identifiant huit secteurs de production numérotés dans le bassin

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) en retournant voir certains acteurs en aparté pour obtenir des données supplémentaires (ex : distribution des cépages dans l'espace, parcelles engagées en AOP, parcelles enherbées), (2) en réalisant un suivi expérimental sur des parcelles viticoles de chaque secteur de production (ex : paramétrage du réservoir utile du sol), (3) en utilisant des résultats issus de la recherche agronomique (ex : seuil de déclenchement de l'irrigation).

Discussion des résultats de simulation de la situation de référence (atelier 3)

La vérification des résultats de la simulation de la situation de référence s'est déroulée en deux temps. D'abord, les chercheurs ont réalisé une vérification quantitative en comparant les résultats des simulations avec des mesures effectuées sur 10 parcelles représentatives de la diversité du bassin versant en termes de types de sol, de types de production (AOP, IGP), d'enherbement et d'irrigation. Le suivi de la contrainte hydrique et des composantes du rendement a permis de calibrer certains paramètres internes du modèle et a participé à renforcer la légitimité du modèle vis-à-vis des acteurs. Ce sont les acteurs qui, au cours de l'atelier 2, ont initié l'idée de ce suivi, qui n'avait pas été initialement prévu dans la démarche.

Puis une vérification "à dire d'experts" avec les acteurs pendant le troisième atelier a permis de

vérifier la cohérence des résultats et de familiariser les acteurs avec le modèle et les types de résultats produits. Nous avons présenté les résultats de simulation pour 10 parcelles représentatives du bassin versant pour la période 1981-2010. La discussion s'est organisée selon : (1) les itinéraires techniques (quantité d'eau pour l'irrigation, nombre de travaux du sol), (2) les dates des stades phénologiques, (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 moyens et la fréquence d'atteinte des rendements objectifs. Cet exercice a permis de questionner et de corriger certaines données d'entrées qui sont apparues inexactes selon les participants. Par exemple, la dose d'irrigation d'abord fixée à 10 mm a été modifiée pour prendre en compte un premier apport plus important de 20 mm. Malgré la difficulté de présenter les résultats bruts du modèle, la place accordée à la discussion a permis de comprendre pourquoi certains résultats ne correspondaient pas à ce qui était observé sur le terrain. Ces décalages sont issus de plusieurs sources : (1) des erreurs dans les paramètres d'entrées qui ont pu être corrigées ; (2) le fait que le modèle ne prenait pas en compte certains processus (ex : tassement des sols, mortalité des ceps). Dans ce cas, nous nous sommes appliqués par la suite à rappeler les conditions de validité du modèle, clarifier les hypothèses principales et améliorer la clarté de notre discours.

Co-construction des représentations des sorties du modèle à l'échelle du bassin versant (atelier 3)
 La dernière étape de test du modèle consistait à discuter les résultats à l'échelle du bassin versant. Il a d'abord fallu définir les indicateurs et leur mode de représentation de manière à ce qu'ils soient à la fois informatifs et utiles aux participants. Ces indicateurs d'évaluation correspondent à une agrégation temporelle et spatiale des sorties du modèle (Allain *et al.*, 2018). Ces sorties incluent, pour chaque parcelle, le rendement, les dates des irrigations, les quantités d'eau apportées, les dates des stades phénologiques, etc. La difficulté résidait dans la quantité importante de données en sortie du modèle (1660 parcelles x 30 années = 49 800 valeurs pour chaque sortie du modèle). Les acteurs ont d'abord sélectionné les sorties du modèle qui les intéressaient le plus, puis ils ont choisi leurs agrégations temporelles, spatiales et leurs modes de représentation. La liste des indicateurs a principalement été établie avec le groupe d'acteurs régionaux (Tableau 2) et a été présentée aux acteurs locaux qui n'y ont pas apporté de modification.

Tableau 2 : Liste des indicateurs d'évaluation

Indicateur	Description	Echelle
Production		
Rendement	Rendement moyen sur 30 ans (t/ha)	Secteur
Volume de production	Volume total moyen de la production de vins sur 30 ans (en 1000 hl)	Bassin versant
R_gel	Nombre d'années sur 30 où T _{min} < 0°C entre le débourrement et la floraison	Aire climatique
R_brûlure	Nombre d'années sur 30 où T _{max} > 40°C entre floraison et véraison	Aire climatique
R_Tmax_mat	Nombre d'années sur 30 où T _{max} > 37°C entre véraison et maturité	Aire climatique
R_Tmin_mat	T _{min} moyenne entre véraison et maturité (°C)	Aire climatique
Ampli_T	T _{max} – T _{min} moyenne entre véraison et maturité (°C)	Aire climatique
Eau		
Besoin annuel en irrigation	Besoin en eau annuel moyen sur 30 ans (mm)	Parcelle
Besoin saisonnier en irrigation	Répartition mensuelle des besoins en eau (mm)	Parcelle
Volume d'eau total	Volume d'eau annuel moyen sur 30 ans nécessaire à l'irrigation (m ³)	Bassin versant
Ruissellement	Volume d'eau ruisselée annuel moyen à la sortie du bassin versant (m ³)	Bassin versant

Les impacts du changement climatique dans le bassin versant

Avancée de la phénologie et risques climatiques associés

Au cours de la période 1981-2010, le cycle végétatif de la vigne (représenté par les barres grises sur la Figure 6A) est plus avancé dans les zones du sud que dans celles du nord. Cette différence de 13 jours à la récolte, confirmée par les acteurs lors de l'atelier 4, est principalement due à des températures moins élevées et à des variétés plus tardives au nord du bassin versant. À l'horizon 2050, la date de maturité est avancée de 10 jours en moyenne, sur l'ensemble du bassin versant. À l'horizon 2100, l'avance phénologique est plus prononcée dans le nord du bassin versant avec une maturité avancée de 3 semaines par rapport à la période 1981-2010, contre 2 semaines dans le sud du bassin. Les dates de débournement de la vigne sont également avancées, dans une moindre mesure, de 7 à 13 jours. Un débournement plus précoce n'entraîne pas une augmentation du risque de gel puisque la date de la dernière gelée dans le climat futur avance également dans les climats simulés par le modèle ALADIN (figure 6B). Toutefois, les acteurs ont souligné que "malgré la moindre occurrence des gelées, nous avons toujours peur d'une gelée tardive".

Les effets combinés de l'avance phénologique et de l'augmentation des températures conduisent à un risque accru de dommages liés aux hautes températures (brûlures sur feuilles ou fruits, échaudage) entre la floraison et la véraison à l'horizon 2100 (Figure 6B). De la même façon, les conditions de maturation des baies évoluent rapidement. Dès l'horizon 2050, les températures nocturnes augmentent de 3,5°C et les températures maximales dépassent 37°C plus de deux ans sur trois, ce qui pourrait altérer les processus de maturation des baies. A l'horizon 2100, comme le souligne un participant : "23°C de température nocturne pendant la maturation, c'est beaucoup".

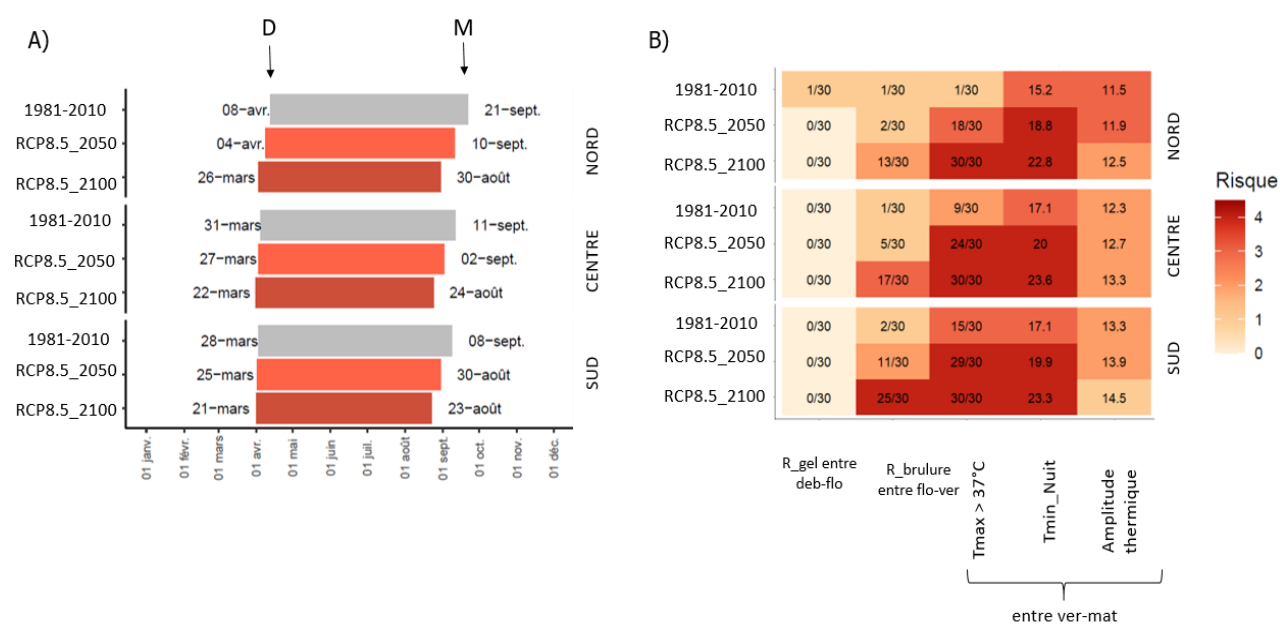


Figure 6 : Impacts du changement climatique (RCP 8.5) sur la phénologie en fonction des zones climatiques (nord/centre/sud). **A)** Positionnement du cycle de la vigne dans l'année selon l'évolution des dates de débournement (D) et de maturité (M). **B)** Risques climatiques portant sur le rendement (gel, brûlure) et la qualité de la récolte (température pendant maturation des baies). Le détail des indicateurs est présenté dans le Tableau 2. Le code couleur correspond au risque (0 : pas de risque, 4 : risque fort) selon la valeur de chaque indicateur.

Des besoins en eau d'irrigation plus précoces, plus importants mais en deçà des apports actuels

Les besoins d'irrigation simulés pour la période 1981-2010 sont, en moyenne, de 21 mm par an à l'échelle de la parcelle, ce qui, sur l'ensemble du bassin versant, correspond à un besoin en eau d'irrigation de 36 000 m³ (Figure 7A). Ce chiffre a semblé faible aux acteurs compte tenu des pratiques actuelles. L'un des participants locaux souligne que "ces chiffres correspondent aux

besoins, pas aux pratiques. Vous seriez surpris par la différence ; la réalité est de plus de 100 mm [par an]". Dans le scénario climatique futur, les besoins en irrigation sont multipliés par 1,8 à l'horizon 2050 et par 2,3 d'ici la fin du siècle. La plus forte augmentation des besoins en eau se produit au printemps (Figure 7B), alors que les besoins d'irrigation de printemps étaient quasiment nuls entre 1981 et 2010. Ces besoins restent toutefois inférieurs aux apports actuels estimés par les acteurs locaux.

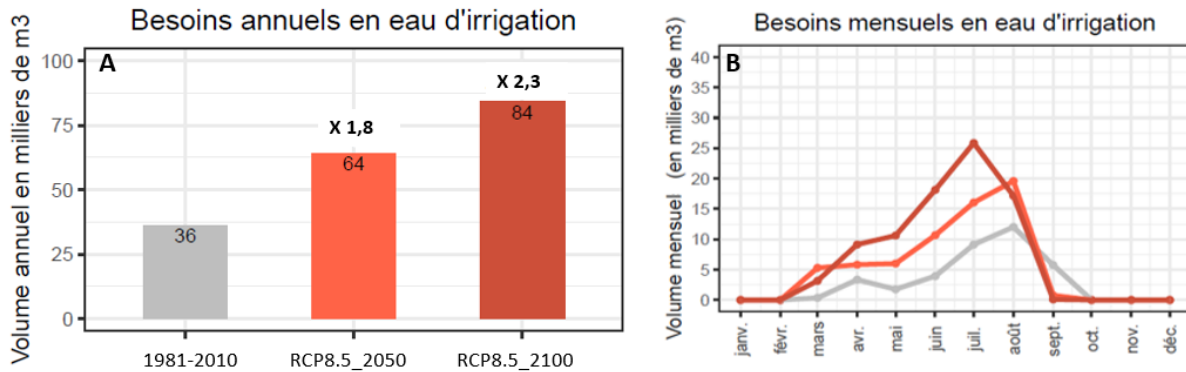


Figure 7 : Impacts du changement climatique (RCP 8.5) sur les besoins annuels en irrigation (A) et mensuels (B) pour la situation de référence (en gris), et le scénario 8.5 à l'horizon 2050 (en orange) et 2100 (en marron). Chiffres moyens sur 30 ans

Une baisse des rendements plus marquée dans les zones les plus productives

Au cours de la période 1981-2010, les rendements les plus faibles (<5 t/ha) se trouvent dans la zone nord avec une production AOP sur sols superficiels, tandis que les secteurs à plus forte productivité (> 15 t/ha) et les zones irriguées sont situés dans le sud (Figure 8). Ces résultats ont été jugés cohérents par les acteurs. Dans le scénario RCP 8.5, les rendements de tous les secteurs diminuent de 0 à 20 % en 2050, et jusqu'à 30 % pour les secteurs les plus productifs du sud du bassin en 2100. L'importante baisse de rendement dans les secteurs irrigués peut s'expliquer par les quantités de précipitations annuelles particulièrement faibles prévues par le scénario RCP 8.5 (< 530 mm/an). Il convient de noter que le modèle pourrait surestimer la baisse de rendement dans le secteur le plus au sud car il ne considère pas la présence d'une nappe phréatique pouvant atténuer le stress hydrique du vignoble.

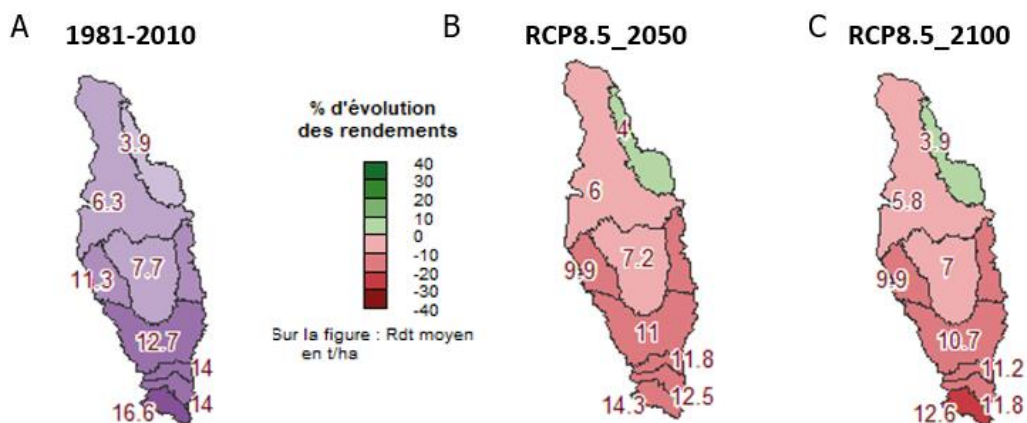


Figure 8 : Impacts du changement climatique (RCP 8.5) sur les rendements moyens selon les différents secteurs de production. Chiffres moyens sur 30 ans des rendements simulés (en t/ha/an) pour chacun des huit secteurs. Les couleurs correspondent aux variations par rapport à la période 1981-2010 (A), pour les simulations aux horizons 2050 (B) et 2100 (C)

En réaction à ces résultats, les participants ont d'abord souligné l'importance de modifier les pratiques culturales, en priorité dans les secteurs du sud. Par exemple, ils ont suggéré qu'"une meilleure gestion de la vigueur pourrait limiter les pertes d'eau par transpiration". Les acteurs de la zone nord ont interprété la faible diminution de leur rendement prévue comme une "bonne nouvelle", mais ont souligné qu'ils "doivent préserver une valorisation économique élevée de leur vin". Enfin, les participants ont suggéré d'élargir la gamme d'indicateurs d'évaluation avec des informations supplémentaires sur l'accumulation de sucre dans les baies (en relation avec le ratio feuilles/fruits) et les aspects économiques à l'échelle de l'exploitation.

A l'échelle du bassin versant, la production totale de raisin pourrait diminuer de 10 % à l'horizon 2050, et jusqu'à 14% en 2100. Le type de production qui subit la baisse la plus importante est la production irriguée IGP, malgré l'augmentation de l'approvisionnement en eau d'irrigation. Dans tous les cas, la production irriguée ne représente qu'une petite partie de la production de la vigne de Riutort (moins de 20% en volume actuellement) et le maintien de la production dans ces zones irriguées ne contrebalancera pas la baisse globale de la production à l'échelle du bassin versant. Les participants à l'atelier ont plaidé pour "un meilleur partage de la ressource en eau" et défendu l'idée de "considérer d'autres pratiques d'irrigation pour une production de qualité" afin d'atteindre l'objectif de limiter l'irrigation tout en sécurisant la production.

Une démarche itérative pour appréhender un enjeu complexe

Rôle des acteurs et gestion de la tension entre complexité et simplification en modélisation

Le choix d'un terrain d'étude réel impose de travailler avec sa complexité, mais a permis une mobilisation rapide et stable des acteurs concernés. Le choix d'un territoire de taille suffisante pour représenter la diversité des systèmes de production des vignobles méditerranéens confère une certaine généralité aux résultats produits. De plus, l'appartenance du bassin étudié à plusieurs territoires a permis de faire travailler ensemble des acteurs aux points de vue différents et donc d'installer des débats instructifs entre des personnes se côtoyant peu. Un réel avantage a consisté à séparer les groupes d'acteurs locaux et régionaux. Le groupe régional a pu apporter quelques informations plus générales et extrapoler ou non les résultats à d'autres zones du département. Plus habitués à mobiliser des sorties de modèles, les participants au groupe régional ont également contribué à construire les indicateurs d'évaluation, et apporté une vision critique des formalismes du modèle. Le groupe d'acteurs locaux a apporté davantage d'informations sur l'adéquation des résultats du modèle à leurs observations empiriques, ainsi que sur la priorisation et la localisation des leviers à envisager.

Les premières étapes de la démarche ont décrit un système très complexe au sein duquel les interactions entre éléments du paysage (sol/climat/pratiques) étaient difficiles à démêler. Par la suite, la construction d'un modèle quantitatif a mené à des simplifications, que ce soit dans les processus représentés (ex : rendement, climat) ou dans les données d'entrées (8 secteurs de production considéré comme homogènes). Cette représentation simplifiée a ensuite pu être enrichie, soit par des indicateurs établis dès l'atelier 3 (ex : conditions de température pour estimer la qualité de la récolte), soit par de nouveaux indicateurs proposés à l'atelier 4 (ex : indicateur d'équilibre du rapport feuille/fruit, évolution des prix nécessaire pour compenser les pertes de rendement). La démarche, au travers de fréquentes interactions entre acteurs et modélisateurs, a permis de trouver le niveau de complexité offrant un compromis entre données disponibles, possibilité d'exploration de scénarios et intérêt de l'étude et de ses résultats pour les participants. Bien que les attentes des acteurs aient été prises en compte pour choisir le modèle, sa structure 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 développé est devenu, au fur et à mesure des couplages, de plus en plus complexe. Ceci se traduit par une quantité de données importante en sortie du modèle et des difficultés à les synthétiser. De plus, les capacités des modèles mécanistes de la vigne pour simuler l'impact de certaines adaptations proposées par

les acteurs sont parfois limitées (ex. cépages tolérants à la sécheresse, haies, etc.). Des approches participatives basées sur des modèles d'évaluation multicritères d'aide à la décision proposent d'établir des indicateurs d'évaluation entièrement avec les acteurs (Aouadi *et al.*, 2020). Ces démarches permettraient d'évaluer un plus large spectre d'adaptations en prenant en compte une plus grande diversité de facteurs locaux (ex. aléas climatiques, stratégies des exploitations) et selon une gamme élargie d'indicateurs. Cependant, l'utilisation stricte de dires d'experts est difficile dans le cadre du changement climatique, du fait des multiples incertitudes à appréhender : quelle évolution du climat ? Quelles réponses des cultures à des combinaisons de stress inédites ? Quels effets combinés des leviers d'adaptations ? Si l'application de ce type de démarche semble complexe pour répondre à l'objectif de notre étude, la combinaison d'un outil multicritère avec le modèle mécaniste permettrait de répondre au défi d'intégrer des informations qualitatives et quantitatives provenant de sources diverses (scientifiques et locales) pour construire les chemins d'adaptation des systèmes agricoles face aux problématiques locales du changement climatique.

Des réflexions sur l'adaptation au changement climatique au-delà du modèle

Le modèle tel qu'il a été utilisé dans notre étude a permis de rapprocher le monde de la recherche et les acteurs d'un territoire soumis au changement climatique. Nos échanges ont permis d'identifier les manques de connaissances scientifiques pour lesquels les acteurs attendent des réponses, notamment concernant certains leviers d'adaptation (ex : qualité des porte-greffes, tolérance des cépages à la sécheresse, pilotage de l'irrigation, effet de l'apport de matière organique). L'approche par leviers s'est révélée intéressante pour l'échange d'informations entre participants. Certains, ayant testé des pratiques alternatives, ont pu partager leur expérience (type de taille, orientation des rangs, etc.).

L'évaluation des impacts du changement climatique au sein du bassin a permis de construire des stratégies d'adaptations localisées. Celles proposées par les participants s'articulent selon quatre axes :

- Retarder les vendanges en utilisant des cépages plus tardifs. A défaut de pouvoir retarder les vendanges dans des conditions plus favorables, des leviers pourraient également permettre de favoriser un microclimat plus frais l'été (arbres, haies, orientation est-ouest des rangs, enherbement, hauteurs de ceps).
- Améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau pour maintenir le niveau de production tout en consommant moins d'eau. La stratégie actuelle menée par certains acteurs est de porter des projets de développement de l'irrigation où cela est possible. Différents projets sont en cours pour passer de 10% de surfaces irriguées actuellement à 30% d'ici 2030. Malgré l'extension des surfaces irriguées, l'enjeu de réduire la consommation en eau de la vigne est important dans tous les systèmes, irrigués ou non. A court terme, il s'agit d'adapter le rapport feuille/fruit pour limiter la surface foliaire qui transpire. La limitation de l'évapotranspiration peut également se faire à l'aide de dispositifs d'ombrage ou de mulch. Enfin, l'enherbement apparaît comme une solution pour favoriser l'infiltration de l'eau. A long terme, la densité de plantation peut être revue à la baisse dans certaines zones très qualitatives du bassin versant, et des cépages tolérants à la sécheresse pourraient être implantés.
- Renforcer l'exploration du réservoir utile du sol par la vigne en améliorant la qualité des sols (augmenter la teneur en matière organique, limiter le tassement, favoriser les mycorhizes).
- Relocaliser les plantations dans l'espace à une échelle très locale, par exemple en abandonnant les parcelles exposées au sud des coteaux à sols superficiels pour installer de nouvelles parcelles dans les bas-fonds.

Les résultats de modélisation ont interrogé les acteurs sur la nécessité d'une véritable transformation de la viticulture à des conditions de production futures difficiles. Même dans les zones *a priori* moins impactées du nord du bassin, la menace d'événements extrêmes plus fréquents, mal simulés par les modèles climatiques et donc omis des simulations, inquiète la

profession. Plusieurs pistes de réflexion ont été abordées en cours d'ateliers. D'abord, l'intérêt de la viticulture dans le paysage ne se limite pas à son rendement et à sa valeur économique. Elle participe au maintien de l'ouverture des paysages et au tourisme. Ainsi, si les rendements, et donc les revenus des viticulteurs, sont amenés à diminuer, il sera peut-être utile de penser à des systèmes de compensation permettant de rémunérer ces autres services rendus par la viticulture. Le fait que le changement climatique restreigne le "droit à l'erreur" concernant les choix techniques, notamment à la plantation, a aussi été soulevé. Ainsi, la formation, l'accès à un matériel végétal de qualité et le partage des connaissances seront aussi des enjeux cruciaux dans l'avenir. Cette étude a montré que le modèle, en plus de fournir des informations quantitatives, a aussi été un moyen pour engager des réflexions élargies et débattre des transformations à venir du secteur viticole.

Conclusion

La combinaison d'une démarche de modélisation mécaniste avec une démarche participative reste un défi, en particulier sur des thématiques prospectives, complexes et incertaines, telles que les questions liées au changement climatique. Notre étude illustre comment les interactions entre acteurs et modélisateurs ont conduit à un modèle original pour évaluer quantitativement les impacts du changement climatique dans un bassin viticole méditerranéen. L'évaluation spatialement explicite des impacts du changement climatique révèle l'hétérogénéité des situations du bassin versant, en fonction des conditions locales (sol et climat) et des systèmes de production viticole (AOP/IGP, irriguées ou non). Dans nos simulations, les zones de production de vins en AOP subiraient moins de pertes de rendement que les zones à forte production (IGP). Cependant, l'ensemble du bassin versant connaîtra des températures élevées, entraînant des risques sur la qualité de la récolte. Les informations apportées par notre étude ont été jugées pertinentes par les acteurs et ont permis d'initier une réflexion sur les stratégies d'adaptation à mettre en place. Ces stratégies seront simulées puis discutées dans une prochaine étape de la démarche.

Références bibliographiques

- Allain, S., Plumecocq, G., Leenhardt, D., 2018. 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.
- Aouadi, N., Macary, F., Ugaglia Alonso, A., 2020. Évaluation multicritère des performances socio-économiques et environnementales de systèmes viticoles et de scénarios de transition agroécologique. *Cahiers Agricultures* 29: 19. DOI : 10.1051/cagri/2020016.
- Barbeau, G., Neethling, E., Ollat, N., Quéno, H., Touzard, J.-M. 2015. Adaptation au changement climatique en agronomie viticole. *Agronomie, Environnement & Sociétés* 5 (1). <https://hal.inrae.fr/hal-02638206>
- Boiffin, J., Benoît, M., Bail, M., Papy, F., Stengel, P., 2014. Agronomie, espace, territoire : travailler « pour et sur » le développement territorial, un enjeu pour l'agronomie. *Cahiers Agricultures* 23: 72-83. DOI : 10.1684/agr.2014.0688.
- Bonfils, P., 1993. Carte pédologique de France à moyenne échelle : Lodève L-22 : notice explicative, carte 1/100 000. Olivet: INRA, Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, 206 p. p.
- Celette, F., Ripoché, 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 (11): 1749-1759. DOI : 10.1016/j.agwat.2010.06.008.
- Fraga, H., Atauri, I. G. de C., Malheiro, A. C., 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.
- Garin, P., Rollin, D., Maton, L., Rinaudo, J.-D., Richard Ferroudji, A., Caballero, Y., 2015. Prospective participative sur l'agriculture du Roussillon face au changement climatique. *Agronomie, Environnement & Sociétés* 5 (1): 57-66.

- GIEC, 2014. Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Geneva, Switzerland : Organisation météorologique mondiale. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_fr.pdf
- 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. DOI : 10.1016/j.eja.2013.11.002.
- 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 (17): 6907-6912.
- Lagacherie, P., Rabotin, M., Colin, F., Moussa, R., Voltz, M., 2010. Geo-MHYDAS: A landscape discretization tool for distributed hydrological modeling of cultivated areas. *Computers & Geosciences* 36 (8): 1021-1032. DOI : 10.1016/j.cageo.2009.12.005.
- Lereboullet, A.-L., Beltrando, G., Bardsley, D. K., 2013. Socio-ecological adaptation to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164: 273-285. DOI : 10.1016/j.agee.2012.10.008.
- Meynard, J. M., 2016. Agronomic knowledge for development: diversity and production pathways. *Agronomie, Environnement & Sociétés* 6 (2): 19.
- Morales-Castilla, I., García de Cortázar-Atauri, I., Cook, B. I., Lacombe, T., Parker, A., van Leeuwen, C., et al., 2020. Diversity buffers winegrowing regions from climate change losses. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 201906731. DOI : 10.1073/pnas.1906731117.
- Moriondo, M., Bindi, M., Fagarazzi, C., Ferrise, R., 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.
- Naulleau, A., Gary, C., Prévot, L., Hossard, L., 2021. Evaluating Strategies for Adaptation to Climate Change in Grapevine Production—A Systematic Review. *Frontiers in Plant Science* 11: 21-54. DOI : 10.3389/fpls.2020.607859.
- Nicholas, K. A., Durham, W. H., 2012. Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: Insights from winegrowing in Northern California. *Global Environmental Change* 22 (2): 483-494. DOI : 10.1016/j.gloenvcha.2012.01.001.
- Ollat, N., Touzard, J.-M., 2014. Impacts and adaptation to climate change: new challenges for the French wine industry. *J. Int. Sci. Vigne Vin* 75-78.
- Réseau Action Climat, 2014. Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques – Recueil d'expériences territoriales. <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/06/Adaptation-de-l%E2%80%99agriculture-aux-changements-climatiques-%E2%80%93-Recueil-d%E2%80%99experiences-territoriales.pdf>
- Tonietto, J., 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.
- van Leeuwen, C., Pieri, P., Gowdy, M., Ollat, N., Roby, J.-P., 2019. Reduced density is an environmental friendly and cost effective solution to increase resilience to drought in vineyards in a context of climate change. *OENO One* 53 (2): 129-146. DOI : 10.20870/oenone.2019.53.2.2420.
- van Leeuwen, C., Schultz, H. R., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Duchene, E., Ollat, N., Pieri, P., et al., 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.
- Voinov, A., 2008. Systems science and modeling for ecological economics. 1st Ed. London: Elsevier, Academic Press, 416 p.

