

Viticulture et changement climatique : adaptation de la conduite du vignoble méditerranéen.

Boutin F.¹, Payan J.C.²

¹Chambre d'Agriculture du Gard 1120 route de Saint Gilles BO 80 054 30 023 Nîmes Cedex 1

² Institut Français de la Vigne et du Vin, Domaine de l'Espiguette 30 240 Le Grau du Roi

Correspondance : bernard.genevet@gard.chambagri.fr

Résumé

Les travaux du GIEC proposent des scénarios d'évolution du climat au cours du XXI^e siècle, aboutissant à des élévations de températures de 1,5°C à 5,8°C. Au-delà de l'approche thermique, d'autres travaux rapportent des réductions substantielles des précipitations annuelles dans l'arc méditerranéen. Ainsi, le cycle végétatif de la vigne devrait se réaliser dans une période plus chaude, mais aussi plus sèche qu'à présent. La production de biomasse et la typicité des produits devraient être affectées. L'adaptation au changement climatique est étudiée par des axes de travail complémentaires :

- la voie de la modélisation : le but a été de se projeter dans l'avenir en utilisant les scénarios du changement climatique. Les modèles simulent le comportement de la vigne en incluant un climat différent, avec ou sans modification des pratiques culturales,
- la voie de l'expérimentation : différentes modifications des pratiques culturales ont été testées sur le terrain afin d'évaluer leurs effets sur la réduction de la contrainte hydrique et/ou le décalage de la phénologie.

Mots-clés : STICS, changement climatique, viticulture, qualité, mode de conduite

Abstract: Viticulture and climate change: adaptation of the conduct of the Mediterranean vineyards.

The work of the IPCC provides scenarios of the 21st century climate change, leading to temperature increases of 1.5 °C to 5.8 °C. Beyond the thermal approach, other works report substantial reductions in rainfall in the Mediterranean region. Thus, the vegetative cycle of the vine should take place in a hotter period, but also drier than now. Biomass production and the typicality of the products should be affected. Adaptation to climate change is studied in complementary work axes:

- modeling approach: the goal was to forecast using climate change scenarios. Models simulate the behavior of the vine considering a contrasting climate, with or without modification of farming practices,
- experimental approach: various changes in cropping practices were tested on field to assess their effects on the water stress reduction and/or offset of phenology.

Keywords: STICS, climate change, viticulture, quality, mode of conduct

Introduction

Le sud de la France sera, d'après les scénarios climatiques probables, l'une des zones les plus touchées par le manque d'eau et l'augmentation des températures. Garcia de Cortazar (2006) a montré que les effets sur le comportement des vignes en termes de rendement et de composition des raisins y seront certainement très marqués (Figure 1). Les rendements seront affectés à la baisse, alors qu'il s'agit de la région française où ils sont déjà parmi les plus faibles.

L'objectif est d'évaluer l'intérêt pour les organismes de conseil viticole d'avoir recours à des outils de modélisation afin de proposer aux vignerons des stratégies d'adaptation de leurs pratiques culturales pour :

- maintenir une production de vin adaptée aux différents segments de production du marché,
- permettre le maintien de la viticulture régionale.

La vitesse de l'évolution climatique future va déterminer la rapidité avec laquelle ces solutions vont devoir être appliquées. L'anticipation étant le maître mot de la réussite de cette adaptation en cultures pérennes, les outils de modélisation paraissent alors indispensables à cette approche.

Le projet vise à étudier les modifications de la conduite de la vigne à envisager pour atténuer les effets du changement climatique, à partir d'un modèle de culture adapté à la vigne (STICS). Depuis le congrès du GIEC de 2007, les scénarios climatiques sont disponibles pour des hypothèses de changement de climat plus ou moins important en continu depuis aujourd'hui jusqu'à 2100. L'impact des différents itinéraires techniques sur plusieurs indicateurs (taux de sucres, rendement, biomasse...) sera d'une part, simulé grâce au modèle de culture et, d'autre part, vérifié par des expérimentations au vignoble.

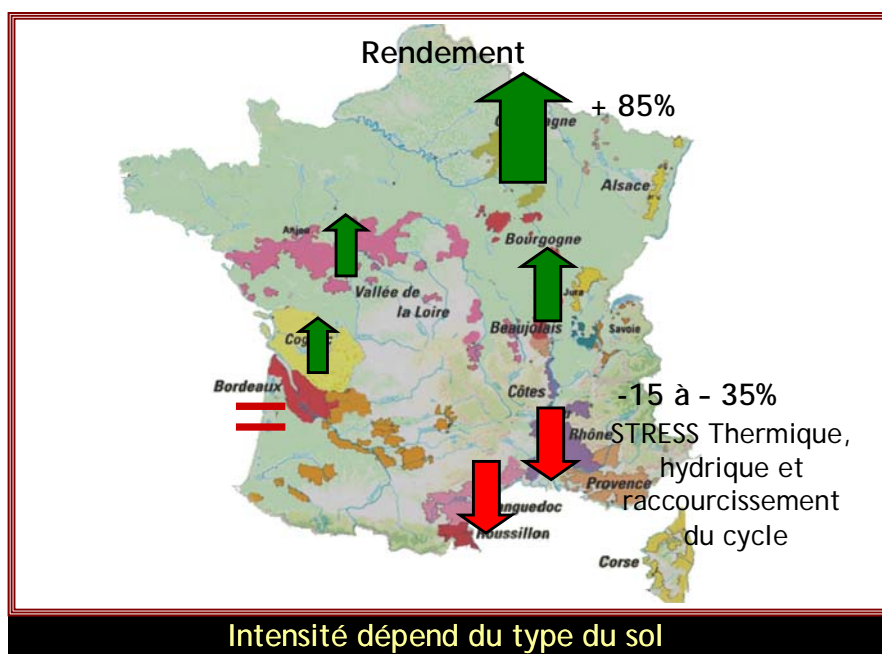


Figure 1 : Simulation des effets du changement climatique sur le rendement de la vigne (Garcia de Cortazar, 2006).

Partenariat

Ce projet a été conduit par les Chambres d'Agriculture du Gard et du Vaucluse et l'IFV en réponse à un AAP CASDAR national. L'organisation structurelle du partenariat est la suivante, en fonction des différentes actions :

	Action1 Mise au point d'indicateurs complémentaires de la qualité du raisin	Action2 Modélisation du comportement de la vigne	Action3 Simulations numériques	Action4 Expérimentations de terrain
CA 30	X	X	X	X
CA 84	X			X

IFV	X	X	X	X
CA 34				X
CIRAME	X	X		
CA26				X
LEGTA 84				X
INRA 84	X	X	X	
Inter-Rhône	X			

Partenaires du projet :

Florent BOUTIN, Bernard GENEVET : Chambre d'Agriculture du Gard
Jean-Christophe PAYAN, Elian SALANCON : Institut Français de la Vigne et du Vin
Olivier JACQUET, Pauline GARIN : Chambre d'Agriculture de Vaucluse
Isabelle MEJEAN : Chambre d'Agriculture de la Drôme
William TRAMBOUZE : Chambre d'Agriculture de l'Hérault
Marie LAUNAY, Dominique RIPOCHE, Frédéric HUARD : INRA Avignon
Myriam BERUD : LEGTA Louis Giraud
Aude GEA, Jean-Pierre RAMEL : CIRAME
Olivier ROUSTANG, Christophe RIOU : Inter-Rhône
Anne PELLEGRINO: SupagrO Montpellier

Méthodologie

La conduite du projet a été articulée autour d'une structuration de quatre actions successives :

Mise au point d'indicateurs complémentaires de la qualité du raisin : le modèle de culture STICS simule la croissance des végétaux en biomasse. Les variables de sortie utilisables sont relatives à la phénologie, au développement végétatif, au rendement et à la teneur en eau des fruits. Si la conversion de la teneur en eau des raisins en alcool probable est pertinente, il manque cependant des variables qualitatives complémentaires pour évaluer correctement les possibilités d'adaptation du vignoble au changement climatique. Une base de données régionale d'analyse de la qualité des raisins a été exploitée afin de définir par analyse statistique les corrélations des principales variables que sont l'acidité des raisins, leur teneur en anthocyanes et la qualité des vins avec différentes variables de sortie de STICS. L'objectif est de rendre compte de l'effet de l'évolution du climat sur les principales composantes qualitatives du raisin.

Modélisation du comportement de la vigne : structuration en deux temps de cette action : (1) transfert et appréhension du modèle de culture par les partenaires scientifiques du projet vers les organismes devant effectuer les simulations et (2) modélisation du comportement de la vigne sur les périodes passées (1970 – 2010) et futures (2000 – 2100). La seule façon d'évaluer la pertinence des simulations proposées pour la période future était de vérifier la justesse des simulations réalisées sur la période passée au regard des observations actuelles. Pour ce faire, des scénarios climatiques ont été générés localement sur la base des données climatiques historiques disponibles. En complément, un travail de définition des itinéraires techniques les plus représentatifs de la région a été effectué. Les simulations ont alors pu être réalisées pour un mode de conduite prédéfini et deux types opposés de sol (profond et superficiel) afin d'expertiser les résultats des simulations.

Simulations numériques : l'objet est de simuler des modifications des pratiques culturales afin d'évaluer leurs effets sur les variables d'inquiétude face au changement climatique que sont la pérennité des ceps, la sensibilité à la contrainte hydrique, la précocité des récoltes, les rendements attendus ou la qualité potentielle des raisins. Un protocole expérimental numérique a ainsi été défini. Il a pour but de structurer les simulations à réaliser avec des variations proportionnées de chacune des modifications des itinéraires techniques sélectionnés. Les interventions simulées concernent les

gestions du volume de végétation, du rendement, de la fertilisation, de l'irrigation autant que de la densité de plantation ou de l'orientation des rangs.

Expérimentations de terrain : en complément, l'évaluation de la qualité des simulations numériques a été approchée par le recueil de données issues d'expérimentations de terrain. Deux voies ont été suivies de façon indépendantes : (1) expérimentations spécifiques de terrain avec actions sur des itinéraires techniques et mesures précises des réponses de la vigne et (2) recensement et analyse des données expérimentales existantes depuis plusieurs années ou acquises au cours du programme. Dans le premier cas, il s'agissait d'éprouver la sensibilité des sorties du modèle de culture face à des variations de densité de plantation, de gestion de la charge en raisin et de gestion du volume de végétation. Les observations au vignoble ont porté sur les caractéristiques de biomasse, de phénologie, de croissance, de maturation, et de contrainte hydrique. Les résultats acquis dans le second cas sont relatifs à l'irrigation, à la densité de plantation, à la fertilisation, à la gestion des rendements, au rognage, à l'ombrage de la végétation, à la taille tardive des ceps.

Résultats

Mise au point d'indicateurs complémentaires de la qualité du raisin :

Pour évaluer l'impact du changement climatique au vignoble à la fin du siècle, les seules variables rendement et taux de sucres paraissent insuffisantes. En effet, un critère de récolte préservant « simplement » un taux de sucres satisfaisant avec un niveau de production constant n'est pas garant d'une qualité telle que l'on peut la connaître actuellement. Il faut compléter ces approches par une évaluation de critères supplémentaires comme l'acidité des raisins, leur couleur, ou l'appréciation qualitative des vins du millésime. Pour ce faire, le travail a consisté en :

- la spécification des formalismes estimant la teneur en sucres des raisins, par des expérimentations de terrain dédiées,
- un travail basé sur l'analyse des corrélations existant entre une base données « maturité » accumulée dans la région des Côtes-du-Rhône méridionales et différentes variables de sorties du modèle STICS.

Les formalismes d'estimation du taux de sucres à partir de la régression issue des observations réalisées sur le terrain en 2010 (*i.e.* grande variabilité de conditions pédo-climatiques) permettent d'améliorer considérablement la prédiction du titre alcoométrique volumique probable (TAVP) des moûts. Sur la Figure 2, les écarts entre valeurs observées et simulées sont remarquablement stables et restreints lorsqu'ils sont appliqués à la variabilité interannuelle issue de la base de données « maturité ».

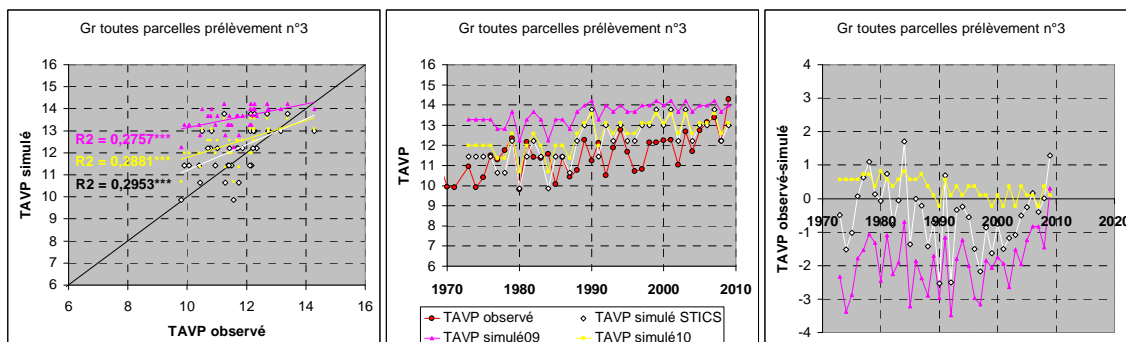


Figure 2 : Comparaison des TAVP observés et simulés par différents formalismes d'interprétation de la teneur en eau des baies (en blanc = formalismes issus de STICS ; en rose : régression issue des observations 2009 ; en jaune : régression issue des observations 2010).

En ce qui concerne l'acidité de titration (Figure 3), le modèle proposé présente un coefficient de détermination de 0,691^{***}. Ce résultat améliore la correspondance entre valeurs observées et simulées par rapport à une simple régression linéaire disponible jusqu'alors entre acidité et teneur en sucres des raisins.

Pour la teneur en anthocyanes (Figure 3), malgré une dispersion importante et un nombre d'individus restreint, le coefficient de détermination est de 0,777^{***}. Ce modèle sera utilisé pour illustrer la tendance d'évolution des anthocyanes sur la période future.

Enfin, pour la note qualitative des vins (Figure 3), avec un coefficient de détermination (non significatif) de 0,058, le modèle proposé ne permet pas de disposer d'une tendance d'interprétation de la qualité des vins produits sur le millésime.

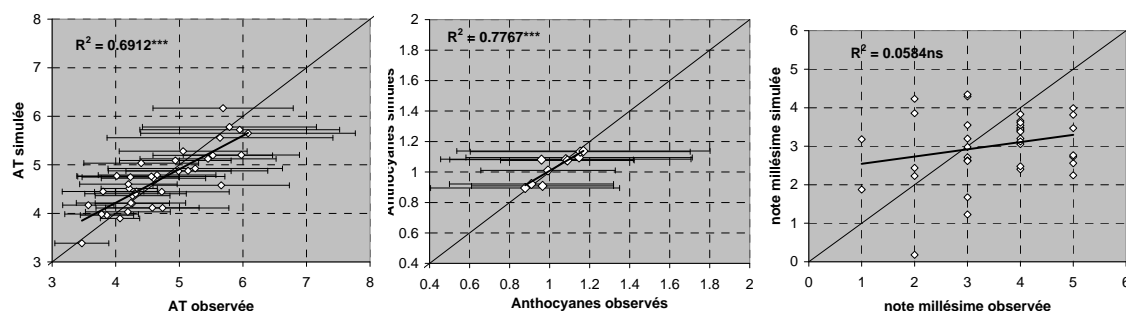


Figure 3 : Comparaison des valeurs observées et simulées dans les Côtes-du-Rhône méridionales pour l'acidité de titration des raisins (gauche), la teneur en anthocyanes des raisins (centre) et la note qualitative des vins du millésime (droite).

En conséquence, le travail accompli a permis d'améliorer la prédiction de la teneur en sucres des raisins et de proposer la simulation de variables qualitatives spécifiques à la vigne jusque-là non disponibles, avec des niveaux de prédiction satisfaisants. Ce travail démontre la possibilité de spécification régionale d'indicateurs complémentaires de la qualité. Il est néanmoins restreint au cas du cépage sélectionné (grenache) et à la gamme de variabilité du jeu de données utilisé pour établir les corrélations.

Modélisation du comportement de la vigne

A l'issue de la définition de mode de conduite standardisé pour la région et d'un cépage représentatif, les modélisations du comportement de la vigne pour plusieurs variables de sortie du modèle traduisant des indicateurs viticoles connus ont été réalisées :

- pour deux types de sol (profond et superficiel),
- deux périodes de simulation (passée et future).

Les principales variables ayant fait l'objet de simulations et d'interprétation des résultats sont :

- la phénologie (débourrement, floraison, véraison et date des vendanges à 13°),
- le rendement,
- l'acidité de titration des raisins à la récolte,
- la teneur des raisins en anthocyanes,
- l'indice de végétation,
- le nombre de jours « chauds » en période de maturation,
- l'indice de contrainte hydrique.

A titre d'exemple, les Figures 4 et 5 présentent les résultats obtenus pour l'évolution de la date de récolte et des rendements.

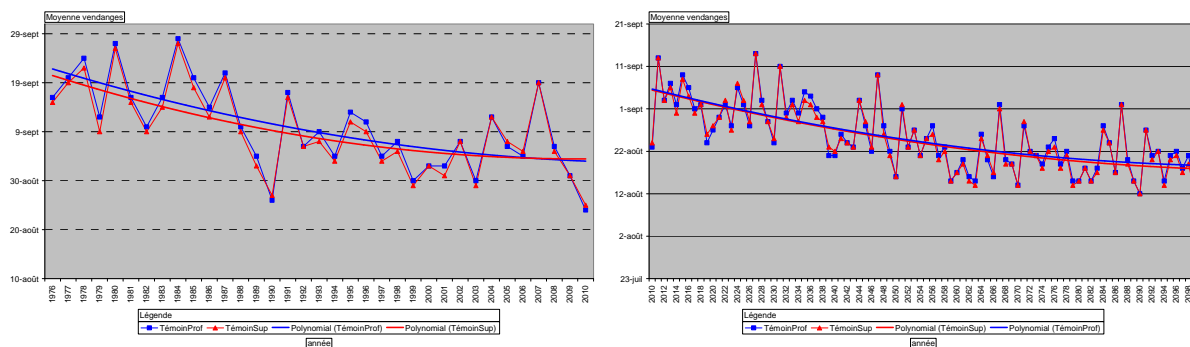


Figure 4 : Simulation de la date de récolte sur la période passée (1970-2010) à gauche et future (2000-2100) à droite. En rouge = sol superficiel. En bleu = sol profond.

La simulation montre, pour la période passée, une avancée de la date de récolte de 17 à 19 jours, quel que soit le type de sol, confirmée par les observations issues des bans de vendanges régionaux. Le même exercice appliqué à la période future illustre là-aussi une avancée similaire au cours du XXIème siècle, à degré de récolte équivalent (TAVP 13°). L'analyse de tous les stades phénologiques montre qu'il s'agit davantage d'un raccourcissement du cycle végétatif que d'une avancée de la phénologie sur l'année.

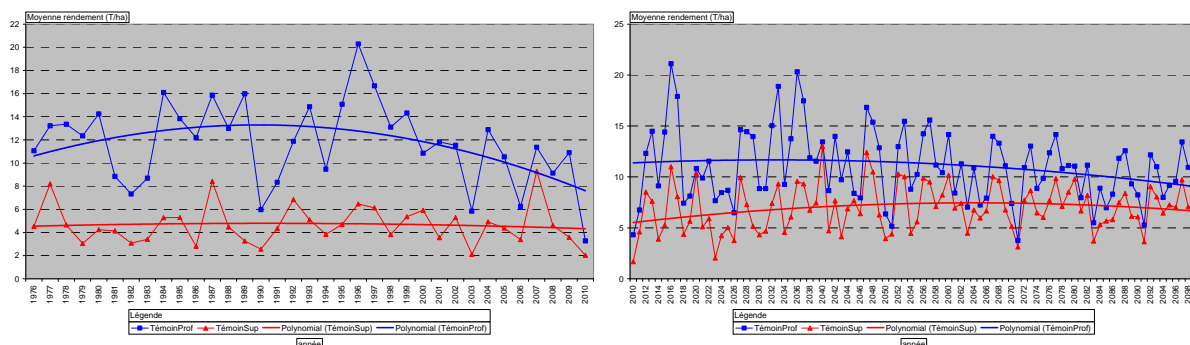


Figure 5 : Simulation des rendements sur la période passée (1970-2010) à gauche et future (2000-2100) à droite. En rouge = sol superficiel. En bleu = sol profond.

Au cours de la période passée, la simulation souligne que les baisses de rendement actuellement ressenties dans la région méditerranéenne seraient davantage le fait de parcelles à rendements élevés que d'une affectation généralisée. Par ailleurs, la baisse des rendements n'intervient qu'à partir des années 1990 (-40% en 2010 par rapport à 1990). Il est, par contre, difficile d'obtenir des données de validation de ces tendances. Seules les déclarations de récolte sont accessibles, sans prise en compte d'éléments de structuration de vignoble ou d'encépagement par exemple. Ce point souligne la difficulté de recours à des analyses critiques pour l'estimation de la qualité de simulation du modèle sur des périodes connues, et *a fortiori* dans le futur. Au cours du XXIème siècle, la simulation indique que la baisse des rendements sous l'effet du climat s'atténue pour les sols profonds (-20%). Pour les sols superficiels au cours du XXIème siècle, les rendements ont tendance à augmenter dans un premier temps sous l'effet de l'accroissement de l'efficacité pour la conversion du carbone due à l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique. Dans la seconde moitié du siècle, la contrainte climatique est plus importante sur le rendement que le bénéfice dû à l'augmentation de la teneur en CO₂. Les rendements augmentent en tendance de 20% sur l'ensemble du siècle pour les sols superficiels : les conditions sont déjà trop limitantes pour qu'une contrainte due au climat puisse s'exprimer, seul peut s'exprimer l'effet « bénéfique » de la teneur en CO₂.

En conclusion, au regard des simulations réalisées sur la période future, les rendements paraissent peu affectés par le changement climatique. Les principales modifications touchent les conditions de maturation, avec une date de récolte avancée et des teneurs en acides et en anthocyanes significativement plus basses qu'actuellement. En ce qui concerne les autres variables, dans les deux types de sol, on constate une évolution à la hausse des réserves carbonées, ceci peut être la conséquence de la prise en compte d'une meilleure efficacité de conversion du CO₂. Par ailleurs, dans la première partie du cycle végétatif (avant floraison), les conditions hydriques ne sont pas limitantes, ce qui peut amplifier les effets induits sur les réserves carbonées décrits ci-avant. Dans la seconde période du cycle, les écarts entre les deux types de sol sont réduits. La contrainte hydrique des sols superficiels est stable sur la série climatique future, mais diminue de façon surprenante pour les sols profonds. Ceci est la résultante de l'évolution du climat qui se traduit de façon dépréciative assez nette sur le LAI, quel que soit le type de sol, limitant ainsi les pertes en eau et par là-même la sensibilité à la contrainte hydrique. De même, l'évolution du nombre de jours excessivement chauds constatée sur la série climatique « passée » se poursuit de façon régulière au cours du siècle à venir, pour atteindre des valeurs extrêmement importantes en fin de siècle, modifiant probablement les caractéristiques qualitatives des raisins. Il est en conséquence important de s'attacher à décrire l'impact des pratiques culturales sur le retardement du cycle végétatif et/ou la réduction des stress hydriques et thermiques.

Simulations numériques

D'après les simulations réalisées sur les périodes « passée » et « future » pour les modes de conduite « témoin », les mêmes variables pertinentes ont été sélectionnées. La modélisation du comportement de la vigne sur la période « future » permet alors d'appréhender l'intérêt des modifications des pratiques culturales pour s'adapter au changement climatique, au regard de l'évolution du témoin.

Variation de la charge en raisin

Le résultat le plus surprenant est que la simulation des différentes charges en raisin ne montre pas de variation de rendement. D'après les simulations, cette technique culturale ne permet pas de modifier le comportement de la vigne. Il semble que les relations sources/puits et la concurrence des organes végétatifs et reproducteurs dans STICS soient sous la prédominance du module « feuille ».

Effet de l'irrigation

Le seul effet significatif de l'irrigation concerne une hausse et une stabilisation des rendements en sol superficiel seulement, pour des apports optimisés de 50 à 75% de l'ETM. Les autres critères étudiés ne semblent pas affectés par l'irrigation, mis à part le niveau de contrainte hydrique bien entendu, et une amélioration de l'indice de végétation.

Fertilisation azotée

La fertilisation azotée apporte des résultats sur le rendement plus importants que l'effet de l'irrigation. Ceci est dû à une synthèse précoce de biomasse plus importante qui entraîne un volume de végétation plus important, bien qu'il y ait davantage de contrainte hydrique dans la seconde période du cycle végétatif sous l'effet d'une perte en eau par transpiration plus importante. Par ailleurs, certains paramètres qualitatifs des raisins tels que les anthocyanes seraient négativement affectés par des apports importants d'engrais azoté. Un optimum d'apport à 90 U par an se dessine dans une optique d'augmentation des rendements.

Irrigation + fertilisation

Entre les deux facteurs testés, la fertilisation a un effet prédominant sur l'irrigation. Cependant, la combinaison des deux techniques permet de maximiser les effets au vignoble sur le rendement, bien que modérés au regard des quantités d'eau et d'azote apportées.

Modification du gabarit de végétation

Le gabarit de végétation a une incidence prépondérante sur le rendement. Plus le gabarit de végétation est grand, plus le rendement est important. Il est surprenant de constater que l'effet du gabarit de végétation sur le rendement est largement supérieur à l'effet du nombre de grappes laissé sur les ceps. Il permettrait de compenser de façon substantielle les incidences du changement climatique, bien plus que ne le permettrait la fertilisation ou l'irrigation, ce qui tend à mettre en évidence un déséquilibre des formalismes gérant les relations sources-puits (végétation/fruits).

Prise en compte des caractéristiques variétales

Les caractéristiques des cépages ne semblent pas avoir été suffisamment paramétrées pour la région méditerranéenne pour rendre les résultats représentatifs. Seuls la syrah et le grenache paraissent exploitables pour la région. Il faudrait travailler spécifiquement les autres cépages dans chaque région pour lesquelles doivent être réalisées des simulations afin que leurs exigences thermiques en terme de phénologie notamment soient correctement et localement paramétrées. De même, un travail de fond sur les sensibilités et paramétrages variétaux à la contrainte hydrique serait à réaliser.

Modification de la densité de végétation

Le seul effet remarquable concerne le rendement. Il est conditionné par une augmentation de la densité en réduisant l'inter-rang. Ceci entraîne un développement de végétation plus important qui induit une contrainte hydrique supérieure, sans effet notable sur la qualité. En fin de siècle, le gain de rendement semble limité au regard du comportement du témoin.

Incidence de l'orientation des rangs

Les simulations sont insensibles à la modification de l'orientation des rangs.

Essai de prise en compte de la conduite en pergola

La conduite en pergola semble être une réponse durable aux secteurs à faible rendement (sols superficiels), malgré une sensibilité supérieure à la contrainte hydrique.

En conclusion, au vu de la sensibilité à la gestion du volume de végétation et son insensibilité aux variations des composantes du rendement, les déterminismes du rapport sources/puits sont à spécifier pour la vigne. Ce problème interdit l'interprétation correcte de toute modification des pratiques culturales, puisqu'une des répercussions directes se traduit par une modification de l'indice de végétation, et perturbe la lecture des résultats. En l'état actuel des choses, le modèle n'est applicable qu'à des simulations des modifications du climat en conditions standardisées, c'est-à-dire paramétrées régionalement pour un mode de conduite et un cépage spécifié.

En conséquence, seul le recours aux observations de terrain pour évaluer l'impact de modifications des pratiques culturales sur les caractéristiques du rendement, de la qualité ou de la contrainte hydrique permet d'approcher les possibilités d'adaptation au changement climatique annoncé.

Expérimentations de terrain

Des expérimentations ont été conduites en plein champ pour quantifier les effets des pratiques culturales sur les trois paramètres essentiels d'adaptations au changement climatique que sont :

- l'effet sur les rendements,
- l'effet sur la maturation,
- l'effet sur la contrainte hydrique.

Gestion de la charge en raisin

Les écarts de charge constatés entre modalités sont conséquents puisque la charge peut être dans certains cas doublée voire plus par rapport au témoin, et à l'inverse diminuée par 2 ou plus, voire réduite à 0 (suppression de toutes les grappes). On constate que ces variations de charge n'ont pas d'effet sur la contrainte hydrique ou sont insuffisants, même lorsque le niveau de contrainte est modéré à fort. La suppression totale de la récolte a également une influence très limitée sur le niveau de contrainte hydrique. Sur le plan qualitatif, les résultats sont sans véritable surprise et conformes à ce qui est constaté dans de nombreux essais du même type :

- les très gros rendements obtenus par un changement de taille entraînent un retard de maturité conséquent (2-3 semaines) mais au prix d'une baisse qualitative (couleur, polyphénols) également conséquente,
- les baisses de rendement par allègement de la charge entraînent un gain qualitatif modéré, non systématique sur l'ensemble des parcelles.

Dans les deux cas, les effets constatés ne sont pas proportionnels aux écarts de rendement. On constate donc que la charge en raisin a peu d'influence sur la contrainte hydrique. Dans une perspective de réchauffement climatique qui entraînerait une hausse de contrainte hydrique et une avance de maturité, la variation de ce facteur ne paraît pas apporter de réponse positive significative, si ce n'est un retard avec des types de taille différents, au risque d'une dépréciation qualitative.

Gestion de l'irrigation

Les études déjà réalisées permettent de piloter les arrosages de manière à maintenir un feuillage actif, maintenir des rendements et conserver un fort potentiel qualitatif. Mal maîtrisée l'irrigation peut, au contraire, être préjudiciable à la qualité. Toutefois, et dans le contexte du changement climatique, bien que maîtrisant la contrainte hydrique, le recours à l'irrigation avance encore davantage la date de récolte et ne semble être une technique bien adaptée qu'à la sauvegarde des rendements.

Gestion de la fertilisation

La fertilisation a un impact sur la production de bois et de raisins, surtout à forte dose. L'impact sur les caractéristiques analytiques du raisin reste limité et il est nul sur la résistance des vignes à la sécheresse.

Gestion du gabarit de végétation

Un rognage sévère, quelle que soit sa période (post floraison ou post véraison), ne permet pas de réduire la contrainte hydrique de façon significative. Un rognage précoce (au plus tard à la floraison), a cependant une action positive sur le rendement en réduisant la coulure et en augmentant le poids des grappes. Seule cette conduite très réductrice du feuillage entre débourrement et floraison a donné un résultat remarquable, avec une production supérieure au témoin et une maturité un peu retardée mais correcte. Un objectif est atteint : globalement cette technique favorise la tardiveté de la récolte, qui peut avoir lieu en conditions moins chaudes, mais elle réduit assez fortement l'accumulation des anthocyanes. Il faut cependant poursuivre l'acquisition de références, notamment sur la fertilité et la vigueur des ceps les années suivantes.

Effet de la densité de plantation

De manière générale, la contrainte hydrique n'est pas influencée par la densité de plantation, sauf dans les cas de fortes densités (plus de 8000 ceps/ha) pour des années de très forte contrainte. Par ailleurs, il n'y a pas de proportionnalité stricte entre l'augmentation des rendements et l'augmentation de la densité de plantation.

Essais de taille tardive

L'objectif de cette technique est de décaler le cycle végétatif par une taille réalisée à proximité de la floraison : les ceps sont ramenés à un faciès hivernal. Malgré des écarts de débourrement induits de 6

à 8 semaines, le décalage de maturité n'a été que de 3 semaines environ, avec une production très aléatoire si ce n'est minime :

- moins de grappes,
- des grappes petites à petites baies,
- un degré plus faible à date équivalente,
- une plus grande acidité,
- une coloration d'intensité inférieure.

La pratique d'une taille tardive n'a pas permis de compenser le déficit hydrique, mais a engendré un décalage de maturation, seul élément en accord avec les objectifs de l'essai dont il serait bon de vérifier les effets secondaires à long terme. Le faible rendement obtenu doit rendre prudent quant à l'utilisation de cette pratique. Le risque de perte de grappes par attaque de mildiou sur grappes doit par ailleurs être pris en considération en procédant à une protection adaptée. Il faut également soulever la question de la pérennité des ceps, qui ont souffert de cette taille en vert.

Ombrage du vignoble

Les essais d'ombrage des vignes mis en place visaient à prévenir les fortes contraintes hydriques en limitant la consommation en eau des vignes. La contrainte hydrique est réduite par l'ombrage des vignes. Les vignes à l'ombre supportent plus facilement une sécheresse prolongée lorsque les réserves sont faibles. Il est probable que cet effet bénéfique n'existe que dans des situations extrêmes. La présence d'une ombrière ne perturbe pas l'assimilation photosynthétique ni le fonctionnement stomatique, par rapport à des vignes exposées au soleil. L'ombrière a cependant un impact sur la maturation des raisins. Les paramètres les plus touchés sont la teneur en sucres (inférieure), en acide malique (supérieure) et la couleur (inférieure). Les résultats sur les polyphénols sont trop hétérogènes pour permettre de conclure, même si une tendance semble se dessiner (moins de polyphénols pour les vignes ombrées). La maturation des raisins sous ombrière semble subir un retard, ce qui signifie que l'on doit pouvoir atteindre les mêmes caractéristiques analytiques en différant la vendange. Si l'on excepte la difficulté de mise en place d'un ombrage, on peut reconnaître que cette pratique offre une alternative intéressante de lutte contre les fortes contraintes hydriques.

Inclinaison de la végétation

L'inclinaison du plan de palissage ne permet ni de repousser la maturité, ni de limiter la contrainte hydrique subie par la vigne.

Analyse critique et perspectives

Un des enseignements majeurs issus de l'utilisation du modèle de culture STICS réside dans la nécessité de différencier les situations pédologiques au sein d'un même ensemble climatique. Nous avons vu que les tendances comportementales simulées ne sont pas les mêmes pour les sols profonds et les sols superficiels. Cet aspect est primordial dans l'évaluation des possibilités d'adaptation au changement climatique. Il faut pouvoir décliner localement l'ensemble des conditions pédologiques spécifiques à la zone en ne pas interpréter une tendance moyenne issue de la modélisation.

Les formalismes utilisés dans STICS permettent de mettre en lumière les raisons ou les hypothèses physiologiques à l'origine du comportement différencié de la vigne en fonction du type de sol. L'utilisation du modèle de culture permet de réaliser des expérimentations numériques sur l'influence des facteurs limitants ainsi identifiés et de dégager des pistes de compréhension du comportement supposé de la vigne face au changement climatique.

Il demeure cependant un certain nombre d'imprécisions et de manque de paramétrage de la vigne dans STICS qu'une utilisation à échelle régionale a permis de révéler. Pour ces raisons, il est difficile

d'envisager une interprétation du comportement agronomique de la vigne autrement que par les tendances pluriannuelles des variables sélectionnées.

Enfin, force est de constater que très peu de variables aujourd'hui utilisées dans STICS vigne peuvent être comparées avec les observations usuelles du vignoble, ce qui perturbe l'interprétation des résultats lorsque la tendance simulée n'est pas en accord avec les hypothèses issues des expertises viticoles.

La modélisation est le seul moyen de simuler l'incidence du climat à moyen ou long terme sur les cultures. Au vu des éléments précédents, il est souhaitable d'affiner les paramètres et formalismes viticoles utilisés dans le modèle STICS, et de le rendre concrètement applicable à la variabilité des conditions de culture et de sol en viticulture.

Conclusion

Seul le recours à la modélisation permet de représenter l'impact du changement climatique à la fin du siècle. En situation de conduite « standard », les simulations réalisées par le modèle STICS montrent des effets différenciés en fonction du type de sol. La problématique de la baisse des rendements sous l'effet du climat ne semble concerner que les sols profonds, les sols superficiels bénéficiant d'un effet « fertilisant » dû à la hausse de la teneur en CO₂ atmosphérique. En terme de contrainte hydrique, l'augmentation des stress n'est perceptible qu'à partir de la floraison. Par ailleurs, certains déséquilibres entre les modules feuille et fruit dans STICS ne permettent pas d'utiliser ce modèle à des fins de recherche des modifications des pratiques culturales les mieux adaptées aux contraintes climatiques à venir. Pour répondre aux attentes des viticulteurs en terme d'adaptation du vignoble au changement climatique par la voie de la modélisation, des formalismes de STICS devraient être retravaillés. Il reste un outil pertinent de simulation de conditions viticoles virtuelles.

Face à cette impasse, seule l'acquisition de références techniques sur le terrain permet d'évaluer l'impact des modifications des pratiques culturales sur la conduite de la vigne. Il faut alors veiller à clairement définir la ou les problématiques de l'étude :

- s'agit-il de lutter contre une baisse des rendements ressentie ? Dans ce cas, les recherches réalisées dans ce programme ont montré l'importance de clairement objectiver ou définir préalablement les causes de cette supposée baisse,
- s'agit-il de limiter les effets d'un stress hydrique ? Dans ce cas, les expérimentations conduites dans ce programme n'ont guère montré que l'efficacité de l'irrigation,
- s'agit-il de lutter contre une avance de la maturation ? Dans ce cas, la taille tardive, l'ombrage de la végétation ou les rognages sévères à véraison pourraient être une réponse à approfondir,
- s'agit-il de préserver la pérennité des ceps ? Dans ce cas, les techniques de fertilisation et d'irrigation pourraient être une solution dont l'intérêt doit être démontré dans cet objectif.

Reste le cas de l'approche variétale en augmentant les connaissances spécifiques sur les variétés actuellement utilisées et/ou leur association avec les porte-greffe. La voie de l'exploration de nouvelles variétés pourraient également être évoquée, moyennant les possibilités d'adaptation dans les secteurs d'origine contrôlée, mais les tests d'adaptation phénologiques réalisés avec STICS montrent qu'aucune variété actuelle ne permettrait de stabiliser la phénologie au regard de l'évolution du climat. Enfin, la voie du déplacement des aires de production n'a pas été étudiée.